

RUÍDO DE EQUIPAMENTOS DE AVAC

CASO DE ESTUDO: A FEUP

JOSÉ MÁRIO MOREIRA VERÍSSIMO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais, irmãos e avó

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar os meus agradecimentos ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho pela sua excelente orientação, ensinamentos, sugestões, disponibilidade e dedicação demonstrada ao longo deste trabalho.

Ao Engenheiro António Eduardo Costa pela dedicação, sugestões e disponibilidade demonstrada na realização dos ensaios.

Ao Engenheiro Pedro Casal que permitiu a visita às áreas técnicas dos equipamentos AVAC na FEUP.

Ao arquiteto Luís Ramalho pela disponibilização de um documento relativo à descrição arquitetónica da FEUP.

Aos meus amigos que estiveram presentes ao longo deste curso pela sua simpatia e amizade.

Por fim, os meus profundos agradecimentos aos meus pais e irmãos que sempre me apoiaram em tudo o podiam e não podiam.

RESUMO

Os equipamentos de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC) assumem hoje em dia um papel fundamental na melhoria da qualidade de vida das populações. Estes equipamentos melhoram a qualidade do ar interior e o desempenho termo-higrométrico dos locais onde são instalados. No entanto, estes sistemas produzem ruído, o qual se pode tornar mais ou menos incomodativo consoante a utilização (contínua ou intermitente), o tipo de aparelho instalado, estado de manutenção, etc.

Como consequência, o ruído produzido por estes equipamentos tem efeitos prejudiciais no ensino devido a diminuírem a capacidade de comunicação e assim interferir com o domínio da palavra.

Este trabalho analisa e caracteriza o ruído de fundo destes aparelhos (AVAC) num caso de estudo: salas de aula da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e tem como objetivo comparar os valores obtidos quer com os valores regulamentares em vigor quer com valores ideais.

Para a análise da incomodidade provocada por estes equipamentos recorreu-se a parâmetros acústicos medidos in situ de modo a ser possível uma caracterização dos locais em análise. Os parâmetros acústicos de análise foram: o nível de pressão sonora (L), o RASTI (Rapid Speech Transmission Index) e o tempo de reverberação (TR).

Os valores dos níveis de pressão sonora com os equipamentos AVAC em funcionamento obtidos, foram avaliados com base em curvas de incomodidade: Noise Criteria (NC) e Noise Rating (NR). Aqueles quando analisados com o funcionamento dos equipamentos na velocidade máxima, deram lugar, respetivamente a valores de NR-35 e NC-34 na melhor sala e de NR-60 e NC-63 na pior. Na sua velocidade de funcionamento normal, a sala com tratamento acústico apresentou o melhor valor, com curvas de NR-28 e NC-26 enquanto a pior sala apresentou curvas NR-55 e NC-55.

Do ruído de fundo foi ainda possível analisar os espectros sonoros e assim concluir quais as frequências que os equipamentos AVAC mais afetam quando entram em funcionamento.

Relativamente ao RASTI, este foi analisado sem e com os equipamentos AVAC em funcionamento de modo a ser possível caracterizar a perda de inteligibilidade com a entrada destes em funcionamento. Para este parâmetro apenas se utilizou os equipamentos AVAC a funcionar na sua velocidade normal. Os melhores valores, sem e com equipamentos AVAC em funcionamento, deram-se na sala que possui tratamento acústico, com valores de 0,77 e 0,76, respetivamente. Nas salas sem tratamento acústico os melhores valores foram respetivamente de 0,50 e 0,49, sendo que a pior apresenta valores de 0,41 e 0,39.

Quanto ao Tempo de Reverberação, este nas frequências de 500 e 1k Hz apresentou o melhor resultado para a sala com tratamento acústico com um valor de 0,6 s, valor abaixo dos 0,8 s máximos recomendados. Para as restantes salas, as quais não possuem tratamento acústico, o melhor resultado foi de 1,7 s e o pior de 3,1 s, valores muito acima do máximo recomendado.

Apresenta-se uma comparação dos valores obtidos com valores regulamentares e com os valores obtidos na tese de Maria Menezes com o tema “Caracterização acústica interior de edifícios escolares reabilitados – O caso da Escola Secundária Rodrigues de Freitas, Porto”.

PALAVRAS-CHAVE: AVAC, ACÚSTICA, RUÍDO DE FUNDO, RASTI, TEMPO DE REVERBERAÇÃO.

ABSTRACT

The Heating, Ventilation and Air Conditioned (HVAC) devices have, nowadays, a very important role in the improvement of the quality of life. This equipment improves the interior air quality and the thermo-hygrometric performance of the places where they are installed. However, these systems generate noise, which can be more or less annoying according to their use (continuous or intermittent), the type of equipment installed, maintenance status, etc. As a consequence, the noise originated from these equipments has harmful effects in teaching once it reduces the communication ability and, therefore, interferes with the speech intelligibility.

This study analysis and characterizes the background noise of these devices (HVAC) in a case study:

Classrooms in the Faculty of Engineering of University do Porto (FEUP) and aims to compare the values obtained with either the legal values and ideal values.

To analyse the annoyance caused by the use of these devices acoustic parameters were measured *in situ* to characterize the sites in question. The acoustic parameters analysed were: the sound pressure level (L), the RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) and the reverberation time (RT).

The values of sound pressure levels obtained with working HVAC equipment were evaluated based on the discomfort curves: Noise Criteria (NC) and Noise Rating (NR). These, when analysed with the equipment at full speed, gave rise respectively to NR-35 and NC-34 curves in the best classroom and NR-60 and NC-63 at the worst (classrooms without acoustic treatment). In its normal operating speed, the classroom with acoustic treatment showed the best value with NR-28 and NC-26 curves while the worst classroom presented NR-55 and NC-55 curves.

From the background noise it was still possible to analyse the sound spectra and thus conclude which were the frequencies that were most affected when HVAC devices start working.

RASTI was analysed with and without the operation of HVAC equipment to characterize the loss of intelligibility when they start working. For this parameter the HVAC devices were only tested running at its “normal” speed. The best values, with and without HVAC equipment operating, were measured in the classroom with acoustic treatment, with values of 0.76 and 0.77, respectively. In the classrooms without acoustic treatment the best values were 0.49 and 0.50 respectively, and the worst classroom had values of 0.39 and 0.41.

Regarding Reverberation Time, at 500 and 1k Hz frequencies, the classroom with acoustic treatment had the best result with a value of 0.6 s, below the recommended 0.8 s. In the other classrooms, which do not have acoustic treatment, the best result was 1.7 s and the worst 3.1 s.

There is shown a comparison between the values measured, the regulation, and the values obtained by Maria Menezes in her thesis “Caracterização acústica interior de edifícios escolares reabilitados – O caso da Escola Secundária Rodrigues de Freitas, Porto”.

KEYWORDS: HVAC, ACOUSTICS, BACKGROUND NOISE, RASTI, REVERBERATION TIME.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS	23
1.2 ESTRUTURA	2
2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. GENERALIDADES	4
2.2.1. NÍVEL DE INTENSIDADE SONORA	4
2.2.2. NÍVEL DE POTÊNCIA SONORA	6
2.2.3. NÍVEL DE PRESSÃO SONORA	6
2.2.4. FREQUÊNCIA	7
2.2.5. CURVAS DE PONDERAÇÃO	9
2.2.6. NÍVEL SONORO CONTÍNUO EQUIVALENTE	11
2.3. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	13
2.3.1. CONCEITOS BÁSICOS	13
2.3.2. PARÂMETROS OBJETIVOS DE MEDIDA DA INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	14
2.3.2.1. AI – ÍNDICE DE ARTICULAÇÃO	14
2.3.2.2. RASTI	15
2.3.2.3. SIL	15
2.4. CURVAS DE INCOMODIDADE	16
2.5. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	18
3. EQUIPAMENTOS AVAC	21
3.1. INTRODUÇÃO	21
3.2. NECESSIDADE DOS SISTEMAS AVAC	21

3.3. IMPORTÂNCIA DA CLIMATIZAÇÃO	22
3.4. SISTEMAS AVAC	24
3.4.1. TIPOS DE SISTEMAS INSTALADOS	24
3.4.2. SISTEMA CENTRALIZADO – UTA'S	24
3.4.2.1. CARACTERIZAÇÃO DAS UTA'S	24
3.4.2.2. PROBLEMA TÍPICOS NAS UTA'S E POSSÍVEIS SOLUÇÕES	26
3.4.3. SISTEMA INDIVIDUAL – ROOFTOP	29
3.4.3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS ROOFTOP'S	29
3.4.3.2. PROBLEMAS TÍPICOS NOS ROOFTOP'S E POSSÍVEIS SOLUÇÕES	30
3.5. SUBJETIVIDADE DO CONCEITO “CONFORTO”	32
 4. LEGISLAÇÃO APLICÁVEL	 37
4.1. PORTUGAL	37
4.2. OUTROS PAÍSES	40
4.2.1. ALEMANHA	40
4.2.2. BRASIL	40
4.2.3. ESPANHA	42
4.2.4. ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA	42
4.2.5. FRANÇA	43
4.2.6. REINO UNIDO	44
4.3. COMPARAÇÃO ENTRE PAÍSES	46
 5. CASOS DE ESTUDO	 49
5.1. CARACTERIZAÇÃO DA FEUP	49
5.1.1. A FEUP ONTEM	49
5.1.2. A FEUP HOJE	50
5.2. AMOSTRAS EM ESTUDO	51
5.3. O RUÍDO DO AVAC NA FEUP	55
5.3.1. OBJETIVOS ACÚSTICOS	55
5.3.2. RUÍDO DE FUNDO	55
5.3.2.1. METODOLOGIA	55
5.3.2.2. RESULTADOS	57
5.3.3. RASTI	72

5.3.3.1. METODOLOGIA.....	72
5.3.3.2. RESULTADOS	73
5.3.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	83
5.3.4.1. METODOLOGIA.....	83
5.3.4.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO ÓTIMO.....	84
5.3.4.3. RESULTADOS	86
6. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	89
6.1. INTRODUÇÃO	89
6.2. COMPARAÇÃO DE VALORES OBTIDOS COM VALORES REGULAMENTARES NACIONAIS	89
6.2.1. RUÍDO DE FUNDO	89
6.2.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	93
6.3. COMPARAÇÃO DE VALORES OBTIDOS COM ESCOLA SECUNDÁRIA RODRIGUES DE FREITAS (PORTO)	95
6.3.1. INTRODUÇÃO	95
6.3.2. RUÍDO DE FUNDO	95
6.3.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	98
7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	101
7.1. CONCLUSÕES.....	101
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Propagação do som na forma de ondas esféricas [3].	3
Figura 2.2 – Variação da pressão sonora sobre a pressão atmosférica [7].	4
Figura 2.3 – Representação da variação da intensidade sonora com o raio [8].	5
Figura 2.4 – Pressão sonora e nível de pressão sonora [17].	7
Figura 2.5 – Gama de audição do ser humano [3].	8
Figura 2.6 – Largura de banda $B = f_2 - f_1$ [3].	8
Figura 2.7 – Variação da frequência com gama auditiva [20].	9
Figura 2.8 – Curvas de ponderação [19].	10
Figura 2.9 – Nível sonoro contínuo equivalente relativo a seis ruídos parcelares [25].	12
Figura 2.10 – Curvas <i>Noise Criteria</i> [40].	17
Figura 2.11 – Curvas <i>Noise Rating</i> [41].	18
Figura 2.12 – Exemplo do tempo de reverberação para um decaimento de 30 dB [42].	19
Figura 3.1 – Zona técnica de Unidade de Tratamento de ar na FEUP. [Foto do autor]	25
Figura 3.2 – Caixa de insuflação de ar na FEUP. [Foto do autor]	26
Figura 3.3 – Caixa de extração de ar na FEUP. [Foto do autor].	26
Figura 3.4 – Problemas típicos nas UTA's [46].	26
Figura 3.5 – Montagem correta de uma UTA [46].	27
Figura 3.6 – Equipamento constituinte de um sistema <i>Rooftop</i> sobre a sala B001 da FEUP. [Foto do autor]	29
Figura 3.7 – Salas de aula da FEUP com sistema <i>Rooftop</i> [48].	30
Figura 3.8 – Problemas do sistema <i>Rooftop</i> quando montados sobre zonas sensíveis ao ruído [adaptado de 46].	31
Figura 3.9 – Montagem correta dos <i>Rooftop's</i> sobre zonas sensíveis ao ruído [adaptado de 46].	32
Figura 3.10 – Variação do <i>met</i> com a atividade física [50].	34
Figura 3.11 – Variação do <i>clo</i> com a quantidade de roupa vestida [50].	34
Figura 3.12 – Relação entre a temperatura operativa ótima, tipo de roupa e tipo de atividade [49].	35
Figura 4.1 – Valores do tempo de reverberação ótimo na frequência de 500 Hz em função do volume e tipo de compartimento conforme a Norma NBR 12179 [65].	41
Figura 5.1 - Casa dos Meninos Órfãos da Cidade do Porto [73].	49
Figura 5.2- Instalações da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto de 1937 a 2000 [75].	50
Figura 5.3 – Instalações da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto de 2000 até à atualidade [76].	51
Figura 5.4 – Sala de aula B002 e planta de localização na FEUP [Foto do autor, 38].	52
Figura 5.5 – Sala de aula B018 e planta de localização na FEUP [Foto do autor, 38].	53
Figura 5.6 – Sala de aula B023 e planta de localização na FEUP [Foto do autor, 38].	53
Figura 5.7 – Sala de aula B027 e planta de localização na FEUP [Foto do autor, 38].	53
Figura 5.8 – Sala de aula B032 e planta de localização na FEUP [Foto do autor, 38].	54
Figura 5.9 – Sala de aula B221 e planta de localização na FEUP [Foto do autor, 38].	54
Figura 5.10 – Sala de aula B333 e planta de localização na FEUP [Foto do autor, 38].	54
Figura 5.11 – Sala de aula B334 e planta de localização na FEUP [Foto do autor, 38].	55

Figura 5.12- Sonómetro da marca <i>Brüel & Kjær</i> , modelo 2260. [Foto do autor] .	56
Figura 5.13 – Localização dos pontos de medição, sem e com AVAC ligado, em cada sala (esq. Desligado, dirt. Ligado).	57
Figura 5.14 – Níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para a sala B002 sem sistema AVAC e com AVAC no máximo funcionamento.	60
Figura 5.15 – Níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para a sala B018 sem sistema AVAC e com AVAC em funcionamento nas posições normal e máxima.	61
Figura 5.16 – Níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para a sala B023 sem sistema AVAC e com AVAC em funcionamento nas posições normal e máxima.	61
Figura 5.17 – Níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para a sala B027 sem sistema AVAC e com AVAC em funcionamento nas posições normal e máxima.	62
Figura 5.18 – Níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para a sala B032 sem sistema AVAC e com AVAC em funcionamento nas posições normal e máxima.	62
Figura 5.19 – Níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para a sala B221 sem sistema AVAC e com AVAC em funcionamento nas posições normal e máxima.	63
Figura 5.20 – Níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para a sala B333 sem sistema AVAC e com AVAC em funcionamento nas posições normal e máxima.	63
Figura 5.21 - Níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para a sala B334 sem sistema AVAC e com VAC em funcionamento nas posições normal e máxima.	64
Figura 5.22 – Diferença entre os níveis sonoros do ruído de fundo com equipamentos AVAC a funcionar no máximo e níveis sonoros do ruído de fundo sem AVAC, por banda de frequência para cada sala.	65
Figura 5.23 – Níveis sonoros do ruído de fundo produzidos pelos equipamentos AVAC nos seus funcionamentos máximo para cada sala de aula.	65
Figura 5.24 – Diferença entre os níveis sonoros do ruído de fundo produzidos pelos equipamentos AVAC nos seus funcionamentos máximos e níveis sonoros do ruído de fundo sem AVAC, para cada sala de aula.	66
Figura 5.25 - Fonte sonora do RASTI, modelo 4225, marca <i>Brüel & Kjaer</i> [Foto do autor].	73
Figura 5.26 – Recetor RASTI, modelo 4419, marca <i>Brüel & Kjaer</i> [Foto do autor].	73
Figura 5.27 – Localização tipo da fonte sonora (FS) e dos pontos de medição do RASTI (1 a 6) em cada sala.	73
Figura 5.28 – Valores de RASTI no eixo de simetria da sala B002.	74
Figura 5.29 – Valores de RASTI a $\frac{1}{4}$ do eixo de simetria da sala B002.	74
Figura 5.30 – Valores de RASTI no eixo de simetria da sala B018.	75
Figura 5.31 – Valores de RASTI a $\frac{1}{4}$ do eixo de simetria da sala B018.	75
Figura 5.32 – Valores de RASTI no eixo de simetria da sala B023.	76
Figura 5.33 – Valores de RASTI a $\frac{1}{4}$ do eixo de simetria da sala B023.	76
Figura 5.34 – Valores de RASTI no eixo de simetria da sala B027.	77
Figura 5.35 – Valores do RASTI a $\frac{1}{4}$ do eixo de simetria da sala B027.	77
Figura 5.36 – Valores de RASTI no eixo de simetria da sala B032.	78
Figura 5.37 – Valores de RASTI a $\frac{1}{4}$ do eixo de simetria da sala B032.	78
Figura 5.38 – Valores de RASTI no eixo de simetria da sala B221.	79
Figura 5.39 – Valores de RASTI a $\frac{1}{4}$ do eixo de simetria da sala B221.	79
Figura 5.40 – Valores de RASTI no eixo de simetria da sala B333.	80
Figura 5.41 – Valores de RASTI a $\frac{1}{4}$ do eixo de simetria da sala B333.	80

Figura 5.42 – Valores de RASTI no eixo de simetria da sala B334.....	81
Figura 5.43 – Valores de RASTI a $\frac{1}{4}$ do eixo de simetria da sala B334.....	81
Figura 5.44 – Fonte sonora, modelo 4224, marca <i>Brüel & Kjær</i> [Foto do autor].....	84
Figura 5.45 – Recetor sonoro, modelo 2260, marca <i>Brüel & Kjær</i> [Foto do autor].	84
Figura 5.46 – Localização tipo da fonte sonora (FS) e dos pontos de medição (1 a 3) do tempo de reverberação em cada sala.....	84
Figura 5.47 – Valores do tempo de reverberação médio para cada frequência em cada sala de aula (e valor máximo ideal de 0,8 s).	87
Figura 6.1 – Valores dos níveis de avaliação padronizados com e sem fator de incerteza (I) para as diferentes salas e o valor limite máximo regulamentar (RRAE) para o funcionamento contínuo.	92
Figura 6.2 – Valores dos tempos de reverberação, com e sem fator de incerteza (I) para as diferentes salas e os valores limites máximos regulamentares do RRAE.....	94
Figura 6.3 – Valores dos níveis do ruído de fundo sem AVAC na média das salas da Escola Sec. Rodrigues de Freitas (Porto) e nas salas da FEUP [86].	96
Figura 6.4 – Valores dos níveis do ruído de fundo provocado pelos equipamentos AVAC na média das salas da Escola Sec. Rodrigues de Freitas (Porto) e nas salas da FEUP para as posições de funcionamento normal e máxima [86].	96
Figura 6.5 – Valores do Tempo de Reverberação médio nas frequências de 500 e 1k Hz para as salas da FEUP e média das salas de aula da Escola Sec. Rodrigues de Freitas (Porto) [86].	99

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Relação existente entre <i>Limiar de Audibilidade</i> e <i>de Dor</i> com Nível de Intensidade Sonora [10].	5
Quadro 2.2 – Potência e nível de potência sonora emitidos por alguns tipos de fontes [8].	6
Quadro 2.3 – Valores numéricos da curva de ponderação A para bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava [3].	10
Quadro 2.4 – Características mais importantes das vogais e consoantes [1, 3].	13
Quadro 2.5 – Valores dos níveis de conversação e dos pesos relativos a cada frequência para bandas de 1/3 e 1/1 de oitava [32].	14
Quadro 2.6 – Relação entre Índice de Articulação, grau de privacidade e grau de inteligibilidade [3].	15
Quadro 2.7 – Relação entre o valor de RASTI e o grau de inteligibilidade da palavra [36].	15
Quadro 2.8 – Valores máximos de PSIL (dB) para que a comunicação seja no limite possível (M: Masculino; F: Feminino) [3, 32, 37].	16
Quadro 2.9 – Valores máximos recomendados para as curvas NC para diferentes tipos de compartimentos [adaptado de [8]].	17
Quadro 2.10 - Valores máximos recomendados para as curvas NR para diferentes tipos de compartimentos [adaptado de [8]].	18
Quadro 3.1 – Características dos equipamentos de Unidades de Tratamento de Ar instalados na FEUP.	25
Quadro 3.2 – Características dos equipamentos tipo <i>Rooftop</i> instalados na FEUP (sobre as salas B001, B002 e B003).	30
Quadro 4.1 – Valores máximos do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1k, 2k Hz para edifícios escolares em função do volume, V (m ³) [adaptado de 3, 56].	39
Quadro 4.2 – Valores máximos do nível de ruído padronizado de equipamentos para edifícios escolares [adaptado de 3, 56].	39
Quadro 4.3 – Valores máximos do tempo de reverberação médio nas frequências de 500 e 1k Hz em diferentes locais mobilados e ocupados segundo a norma DIN 18041 [adaptado de 58].	40
Quadro 4.4 – Valores máximos do ruído de fundo provocado pelos equipamentos AVAC pela norma alemã DIN 4109 [adaptado de 62].	40
Quadro 4.5 – Valores de conforto e máximos do nível sonoro do ruído de fundo provocado pelos equipamentos de ar-condicionado em diferentes locais segundo a norma NBR 6401 [adaptado de 64].	41
Quadro 4.6 – Valores máximos do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1k, 2k Hz em diferentes locais segundo o DB-HR [adaptado de 67]].	42
Quadro 4.7 – Valores máximos do nível sonoro do ruído de fundo provocado pelos equipamentos AVAC segundo DB-HR [adaptado de [67]].	42
Quadro 4.8 – Valores máximos do nível sonoro do ruído de fundo provocado pelos equipamentos AVAC pela norma ANSI/ASA S12.60 [adaptado de 68].	43
Quadro 4.9 – Valores máximos do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1k, 2k Hz em diferentes locais segundo a norma ANSI/ASA S12.60 [adaptado de 68].	43
Quadro 4.10 – Valores máximos do nível sonoro do ruído de fundo provocado pelos equipamentos AVAC em diferentes locais segundo o Decreto – Lei nº 92 – 1444, França [adaptado de 69].	44
Quadro 4.11 – Valores máximos do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1k, 2k Hz em diferentes locais segundo o Decreto-Lei nº 92-1444, França [adaptado de 69].	44
Quadro 4.12 – Valores máximos do nível sonoro do ruído de fundo em diferentes locais segundo o BB93 [adaptado de 70].	45

Quadro 4.13 – Valores máximos do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1k e 2k Hz em diferentes locais segundo o BB93 [adaptado de 70].	45
Quadro 4.14 – Valores máximos normativos e regulamentares do nível sonoro contínuo equivalente (L_{Aeq}) e do tempo de reverberação médio em função do volume para sete países.	46
Quadro 5.1 – Características geométricas e número de caixas de insuflação e extração de ar presentes em cada tipo de sala da FEUP.	52
Quadro 5.2 – Velocidades normais e máximas de funcionamento dos equipamentos AVAC segundo o tipo de sala da FEUP.	57
Quadro 5.3 – Níveis de pressão sonora contínuos equivalentes (L_{eq}) e filtrados A (L_{Aeq}) para as diferentes salas, sem o sistema AVAC em funcionamento.	58
Quadro 5.4 – Níveis de pressão sonora contínuos equivalentes (L_{eq}) e filtrados A (L_{Aeq}) para as diferentes salas, com o sistema AVAC em funcionamento no máximo.	59
Quadro 5.5 – Níveis de pressão sonora contínuos equivalentes (L_{eq}) e filtrados A (L_{Aeq}) para as diferentes salas, com o sistema AVAC em funcionamento normal.	60
Quadro 5.6 – Nível de pressão sonora e nível de ruído de fundo para as diversas salas, com e sem funcionamento dos equipamentos AVAC.	64
Quadro 5.7 – Valores das curvas NR e NC para as diferentes salas, considerando diferentes velocidades de funcionamento dos equipamentos AVAC.	68
Quadro 5.8 – Valores de AI para as diferentes salas com e sem funcionamento dos equipamentos AVAC.	69
Quadro 5.9 – Valores de PSIL para as diferentes salas com e sem funcionamento dos equipamentos AVAC.	70
Quadro 5.10 – Valores de RASTI sem e com AVAC na sala B002.	74
Quadro 5.11 – Medição dos valores de RASTI sem e com AVAC (na posição 2) na sala 018.	75
Quadro 5.12 – Medição dos valores de RASTI sem e com AVAC (na posição 2) na sala B023.	76
Quadro 5.13 – Medição dos valores de RASTI sem e com AVAC (na posição 2) na sala B027.	77
Quadro 5.14 – Medição dos valores de RASTI sem e com AVAC (na posição 2) na sala B032.	78
Quadro 5.15 – Medição dos valores de RASTI sem e com AVAC (na posição 3) na sala B221.	79
Quadro 5.16 – Medição dos valores de RASTI sem e com AVAC (na posição 3) na sala B333.	80
Quadro 5.17 – Medição dos valores de RASTI sem AVAC e com (na posição 3) na sala B334.	81
Quadro 5.18 – Classificação das salas de aula quanto ao grau de inteligibilidade para sistema AVAC ligado e desligado.	82
Quadro 5.19 – Valores do tempo de reverberação ótimo nas frequências de 500 e 1k Hz para salas de aula ocupadas em função do tipo de ruído ambiente [82].	85
Quadro 5.20 – Valores do tempo de reverberação nas diferentes salas de aula.	86
Quadro 6.1 – Níveis de avaliação corrigido do ruído particular de equipamentos nas salas com equipamentos AVAC a funcionar em velocidades normais.	90
Quadro 6.2 – Níveis de avaliação corrigido do ruído particular de equipamentos nas salas com equipamentos AVAC a funcionar em velocidades máximas.	90
Quadro 6.3 – Comparação dos valores dos níveis de avaliação padronizado do ruído particular de equipamentos nas salas com equipamentos AVAC a funcionar em velocidades normais e máxima com valor limite do RRAE.	91
Quadro 6.4 – Diferença entre os níveis de avaliação padronizados do ruído particular de equipamentos AVAC nas velocidades normais e máximas com o limite do RRAE.	91
Quadro 6.5 – Comparação dos valores dos tempos de reverberação para as diferentes salas de aula com o limite regulamentar do RRAE.	93

Quadro 6.6 – Valores dos níveis sonoros do ruído de fundo sem AVAC e níveis sonoros do ruído de fundo com o funcionamento dos equipamentos AVAC na posição normal e máxima nas salas da FEUP e na média das salas da Escola Sec. Rodrigues de Freitas [86].	95
Quadro 6.7 - Valores das curvas NR e NC para a média das salas de aula da Escola Secundária Rodrigues de Freitas e salas da FEUP, considerando diferente velocidades de funcionamento dos equipamentos AVAC [86].	97
Quadro 6.8 - Valores do tempo de reverberação por bandas de frequências para as salas de aula da FEUP e para a média das salas da Escola Sec. Rodrigues de Freitas (Porto) [86].	98
Quadro 7.1 – Quadro resumo dos valores dos níveis sonoros do ruído de fundo e RASTI sem e com a presença do funcionamento dos equipamentos AVAC na FEUP, bem como dos valores médios do tempo de reverberação.	101
Quadro 7.2 – Quadro resumo dos valores do AI e do SIL sem e com a presença do funcionamento dos equipamentos AVAC na FEUP.	102

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ΔL – Variação do nível de pressão sonora (dB)

ΔL_A – Variação do nível sonoro (dB)

$\Delta RASTI$ – Variação de RASTI

Θ – Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)

α – Coeficiente de absorção

ρ – Massa volúmica do ar (kg/m^3)

A – Absorção sonora equivalente (m^2)

AI – *Articulation Index*

$ANSI$ – *American National Standards Institute*

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado

B&K – *Brüel & Kjaer*

c – Celeridade (m/s)

C_{80} – Claridade (dB, base 80 ms)

D_{50} – Definição (base 50 ms)

EUA – Estados Unidos da América

f – Frequência (Hz)

f_0 – Frequência central de banda (Hz)

f_1 – Frequência limite inferior de banda (Hz)

f_2 – Frequência limite superior de banda (Hz)

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FS – Fonte sonora

I – Intensidade sonora (W/m^2)

I_0 – Intensidade sonora de referência (W/m^2)

ISO – *International Organization for Standardization*

K – Constante que toma o valor de 1 ou 1/3 consoante a banda de frequência seja 1 ou 1/3

L_A – Nível sonoro (dB)

L_{Aeq} – Nível sonoro contínuo equivalente (dB)

L_{eq} – Nível pressão sonora contínuo equivalente (dB)

L_I – Nível de intensidade sonora (dB)

L_p – Nível de pressão sonora (dB)

L_W – Nível de potência sonora (dB)

NC – *Noise Criterion*

NR – *Noise Rating*

p – Pressão (Pa)

p_0 – Pressão de referência (Pa)

r – Distância à fonte (m)

RASTI – *Rapid Speech Transmission Index*

RF – Ruído de Fundo

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

S – Área (m^2)

SIL - *Speech Interference Level*

SMACNA - *Sheet Metal and Air Conditioning Contractor's National Association*

STI – *Speech Transmission Index*

T – temperatura do ar (K)

TR – Tempo de reverberação (s)

$TR_{Ocupado}$ – Tempo de reverberação ótimo da sala ocupada (s)

TR_{Vazia} – Tempo de reverberação ótimo da sala vazia (s)

TR20 – Tempo de reverberação obtido por decaimento de 20 dB (s)

TR30 – Tempo de reverberação obtido por decaimento de 30 dB (s)

$TR_{[500, 1k Hz]}$ – Média entre $TR_{[500 Hz]}$ e $TR_{[1k Hz]}$ (s)

$TR_{[500, 1k, 2k Hz]}$ – Média entre $TR_{[500 Hz]}$, $TR_{[1k Hz]}$ e $TR_{[2k Hz]}$ (s)

V – Volume (m^3)

W – Potência sonora (W)

W_0 – Potência sonora de referência (W)

1

Introdução

1.1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

O Homem, desde os tempos mais remotos, sempre sentiu a necessidade de comunicar. Este fato encontra-se evidenciado nas cavernas, através das pinturas rupestres, em que o Homem usava os desenhos como forma de expressão. Com a evolução, o Homem foi à procura de reproduzir sons na tentativa de comunicar. Começou com a criação de fonemas, desenvolvendo-os, criando a linguagem oral e depois a linguagem escrita [1].

Bordenave afirma que:

“E para que serve a comunicação? Serve para que as pessoas se relacionem entre si, transformando-se mutuamente e a realidade que as rodeia. Sem a comunicação cada pessoa seria um mundo fechado em si mesmo. Pela comunicação as pessoas compartilham experiências, ideias e sentimentos. Ao se relacionarem como seres interdependentes, influenciam-se mutuamente e, juntas, modificam a realidade onde estão inseridas” [2].

A linguagem assume um papel essencial para que o Homem seja capaz de viver em sociedade. Através desta, consegue expressar sentimentos, ideias, conceitos, bem como trocas de informação com outros e assim evoluir.

Desde o nascimento, o ser humano é posto em contato com um mundo em que a comunicação verbal é o principal motor de desenvolvimento das capacidades intelectuais.

A Escola assume um papel fundamental no desenvolvimento das capacidades de comunicação pois é neste local que o processo de aprendizagem começa a tomar verdadeiros contornos. Como tal, uma sala que possua uma boa acústica é fundamental para o sucesso escolar. Os parâmetros acústicos que mais afetam a inteligibilidade da palavra são o tempo de reverberação e o nível de ruído de fundo, que têm sido alvos de legislação de forma a mantê-los dentro de valores aceitáveis.

No entanto, estes parâmetros não são fáceis de se controlar devido à diversidade de atividades que ocorrem dentro de um edifício escolar, uma vez que junto às salas de aula, muitas vezes, estão corredores e átrios que, devido à presença de pessoas, se tornam locais ruidosos, aumentando, consequentemente, o ruído no interior das salas de aula.

Muitas escolas secundárias, como algumas universidades, têm sido alvo de melhoria em termos de conforto térmico através da introdução de equipamentos de aquecimento, ventilação e ar-condicionado. Estes equipamentos permitem controlar o ambiente interno em termos de temperatura e humidade, de forma a melhorar as condições.

No entanto, estes equipamentos, quando instalados, produzem ruído para o interior dos locais prejudicando de forma direta a qualidade do ensino. Isto advém do fato de muitas vezes não serem realizados projetos com boa qualidade, esquecendo ou ignorando o ruído que estes equipamentos produzem.

As faculdades, e em particular a Faculdade de Engenharia da Faculdade do Porto (FEUP), possuem muitas e grandes salas de aula, devido à quantidade de alunos que acolhem. Uma sala de aula de grandes dimensões com um ruidoso sistema AVAC em funcionamento, dificulta a capacidade do ser humano em perceber as palavras. Isto acontece apesar de os indivíduos que frequentam estes estabelecimentos apresentarem o seu vocabulário praticamente definido, em oposição aos alunos do ensino básico, e por isso serem capazes de compreender uma palavra, mesmo que mal percebida, só pelo contexto.

Pretende-se, assim, através de medições realizadas *in situ*, caracterizar o ruído provocado pelos equipamentos AVAC na FEUP, recorrendo a parâmetros objetivos e compará-lo com o ruído existente na escola secundária Rodrigues de Freitas (Porto) por forma a averiguar se com o evoluir dos tempos tem havido um maior cuidado no projeto dos edifícios escolares, relativamente ao ruído produzido pelos equipamentos AVAC.

1.2 ESTRUTURA

A presente dissertação encontra-se organizada em sete capítulos:

O Capítulo 1 consiste na análise da necessidade de comunicação para o desenvolvimento do Homem, e faz uma breve introdução aos problemas introduzidos pelos sistemas AVAC no ensino.

O Capítulo 2 consiste na abordagem de conceitos acústicos relevantes no contexto da Acústica de Edifícios, para a compreensão do estudo realizado.

O Capítulo 3 descreve a importância dos equipamentos de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC), descrevendo os tipos de equipamentos instalados na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e a sua relação com a subjetividade do conceito conforto.

O Capítulo 4 aborda a legislação nacional e estrangeira, comparando-as em relação ao nível de ruído de fundo provocado pelos equipamentos AVAC e em relação ao tempo de reverberação.

O Capítulo 5 consiste no caso de estudo, fazendo uma breve descrição da FEUP, apresenta os processos de medição, os resultados e a sua análise.

O Capítulo 6 apresenta a discussão de valores obtidos *in situ* com valores legislativos nacionais e compara os valores da FEUP com os valores medidos na escola secundária de Rodrigues de Freitas (Porto).

O Capítulo 7 finaliza o estudo apresentando as conclusões alcançadas dando, também, recomendações para possíveis desenvolvimentos futuros.

2

Conceitos e definições

2.1. INTRODUÇÃO

As salas de aula são lugares onde é essencial haver boas condições acústicas para uma comunicação eficiente. Estes locais são na maioria das vezes rodeados por fontes sonoras de ruído, quer internas quer externas. No caso de estudo aborda-se as fontes de ruído internas e torna-se portanto necessário proceder à compreensão dos conceitos e definições essenciais no domínio da Acústica de Edifícios. Para isso são abordados nos subcapítulos seguintes os conceitos gerais.

A Acústica é a ciência em que se analisa e estuda as ondas sonoras [3]. Pode definir-se como sendo o estudo, que se inicia na fonte sonora e termina no recetor. A onda sonora propaga-se como sendo energia sob a forma de ondas vibratórias em meios físicos [4]. As ondas sonoras propagam-se através de pequenos movimentos de partículas do meio em torno de uma posição de equilíbrio, propagando-se em todas as direções sob a forma esférica, gerando zonas de compressão e de rarefação (Figura 2.1). Estas oscilações provocam a vibração do meio físico pelo qual a onda sonora se desloca, originando uma variação de pressão que se propaga no espaço até atingir o recetor. Caso se trate do ser humano, o resultado da vibração pode originar duas respostas distintas em função do significado que o cérebro dá a essa vibração. Considera-se *som* caso o estímulo provocado seja agradável ou tenha significado, ou considera-se *ruído* caso o estímulo provocado seja desagradável ou sem significado [3, 5, 6].

A interpretação que se dá à variação de pressão torna-se dependente da pessoa que a está a ouvir, pois para uns pode ser *som* e para outros pode ser *ruído*. Tal poderá ser facilmente percebido através da música emitida numa discoteca, em que para os utentes deste espaço o que aí é emitido considera-se *som* e para os vizinhos destes locais é considerado *ruído* [3].

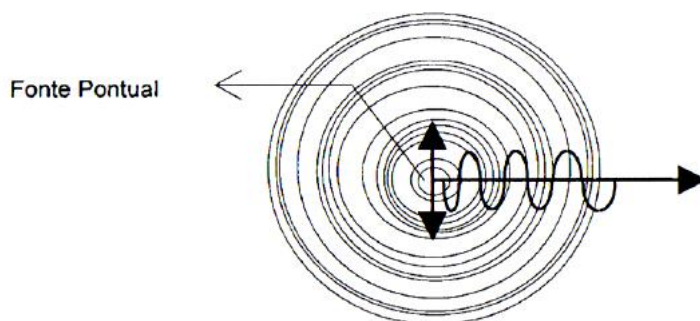


Figura 2.1 – Propagação do som na forma de ondas esféricas [3].

A variação de pressão provocada pelas ondas sonoras em torno de uma posição de equilíbrio (que no caso da Terra tem um valor aproximado de 101.400 Pa, valor da pressão atmosférica média) é a responsável pela criação de *som* ou *ruído* (Figura 2.2). A variação de pressão assume sempre valores muito pequenos, pois mesmo um avião não altera mais do que 10 Pa [3].

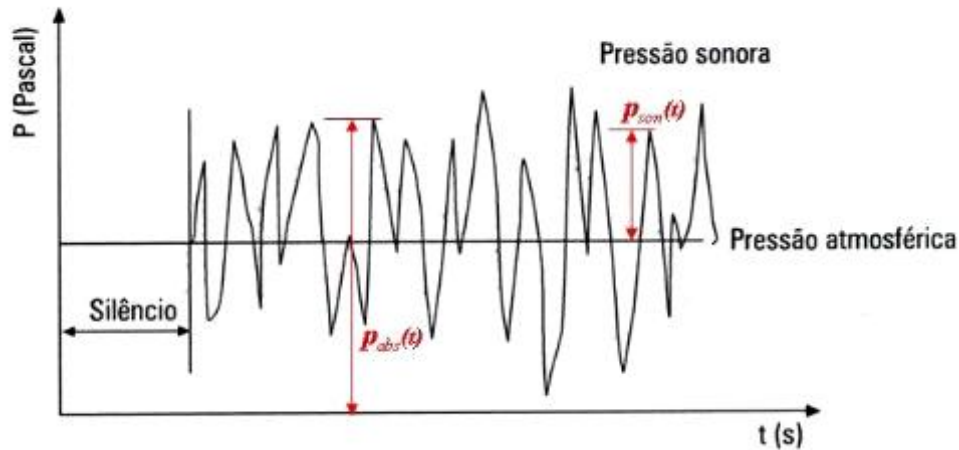


Figura 2.2 – Variação da pressão sonora sobre a pressão atmosférica [7].

A velocidade de propagação do som varia consoante a temperatura ambiente. Pode-se considerar, sem grande erro, que a velocidade de propagação assume a seguinte expressão (Equação 2.1):

$$c = 20,045\sqrt{T} \quad (2.1)$$

Onde,

T - temperatura ambiente em graus kelvin (K), que assume a seguinte expressão (Equação 2.2):

$$T(K) = 273,15 + \theta(^{\circ}\text{C}) \quad (2.2)$$

2.2. GENERALIDADES

2.2.1. NÍVEL DE INTENSIDADE SONORA

A intensidade sonora permite avaliar se um som é “forte” ou “fraco” e define-se como sendo a quantidade de energia média que atravessa, por segundo e por unidade de área, uma dada direção perpendicular à direção de propagação da onda (Figura 2.3) [8, 9].

Para o cálculo da intensidade sonora, pode supor-se uma esfera fictícia dotada de um raio r , em que a fonte sonora emite a uma potência de W , expresso em watt. A expressão da intensidade sonora tem a seguinte forma (Equação 2.3):

$$I = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.3)$$

Onde,

W – potência sonora (w);

S – área da superfície esférica fictícia (m^2);

r – raio da superfície fictícia (m).

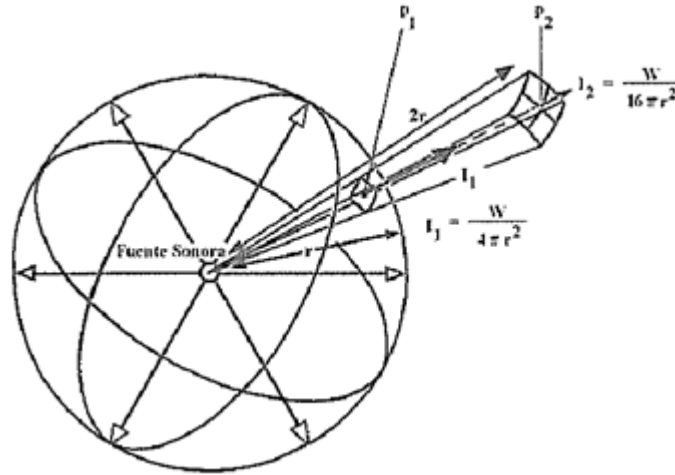


Figura 2.3 – Representação da variação da intensidade sonora com o raio [8].

Esta expressão é válida caso se admita que se trata de uma fonte pontual e pode-se afirmar que a intensidade sonora varia inversamente ao quadrado da distância em relação à fonte sonora [8].

É conveniente expressar os resultados sobre a forma logarítmica, devido à vasta gama de valores que pode apresentar. Faz-se o uso do nível de intensidade sonora, L_I , para considerar este fato (Equação 2.4).

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ (dB)} \quad (2.4)$$

Onde,

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

O ser humano consegue ouvir numa gama de valores que vai desde a intensidade mínima capaz de ser audível, denominada de *Limiar de Audibilidade*, até ao valor máximo de intensidade audível que não provoca danos fisiológicos ou dor, denominado de *Limiar da Dor*. Os limites analisados correspondem a um som puro de frequência de 1000 Hz e podem assumir os valores limites expressos no quadro 2.1. [10].

Quadro 2.1 – Relação existente entre *Limiar de Audibilidade* e *de Dor* com Nível de Intensidade Sonora [10].

Limiar de Audibilidade	Limiar de Dor
$I = 10^{-12} \text{ W/m}^2$	$I = 1 \text{ W/m}^2$
$10 \times \log \frac{10^{-12}}{10^{-12}} = 0 \text{ dB}$	$10 \times \log \frac{1}{10^{-12}} = 120 \text{ dB}$

2.2.2. NÍVEL DE POTÊNCIA SONORA

A potência sonora corresponde à quantidade de energia total que num segundo atravessa uma esfera fictícia de raio, r , emitida por uma fonte, e expressa-se em watt. A potência sonora pode tomar duas formas de análise: a potência instantânea e a potência média. A potência instantânea é a quantidade de energia irradiada pela fonte sonora em um qualquer instante de tempo e pode ser definida também como potência de pico. A potência média é tal como o próprio nome indica, uma média de todos os valores emitidos pela fonte sonora num determinado intervalo de tempo [3,8].

Para os cálculos normalmente efetuados utiliza-se a potência média, sendo conveniente expressar a potência sonora sobre a forma logarítmica devido aos vastos valores que esta pode assumir. Faz-se uso do nível de potência sonora, L_w , que toma em conta o uso da função logarítmica (Equação 2.5) [3, 11].

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} (dB) \quad (2.5)$$

Onde,

$$W_0 = 10^{-12} \text{ W}$$

No quadro 2.2 são apresentados alguns dos valores que a potência sonora e o nível de pressão sonora podem apresentar em função das fontes emissoras.

Quadro 2.2 – Potência e nível de potência sonora emitidos por alguns tipos de fontes [8].

Fonte Sonora	Potência sonora (W)	Nível de potência sonora (dB)
Motor foguetão Saturno	10^7	190
Britadeira	10^4	160
Fábrica química	10^3	150
Unidade hidráulica	10^2	140
Siderurgia	10	130
Compressor	1	120
Rebitadeira	10^{-2}	100
Oficina	10^{-4}	80
Rua tranquila	10^{-6}	60
Estúdio de televisão	10^{-8}	40
Estúdio de rádio	10^{-9}	30

2.2.3. NÍVEL DE PRESSÃO SONORA

A pressão sonora corresponde a variações de pressão provocadas pelas ondas sonoras face à situação de referência da pressão atmosférica normal, ou seja, trata-se da diferença entre a pressão provocada pela onda sonora e a pressão atmosférica [12]. Assim o ser humano apresenta para *limiar da audição* um valor mínimo da variação de pressão de cerca de 10^{-5} Pa e para o *limiar da dor* um valor máximo da variação de pressão de cerca de 100 Pa. O nível de pressão sonora surge como medida usual

quando se fala em amplitude de onda sonora devido à sensibilidade do ouvido às variações de pressão e por ser uma quantidade simples de ser medida [13, 14]. Poderá ser determinado através da expressão 2.6.

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (2.6)$$

Onde,

$$p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

Relativamente à expressão anterior é de salientar que o valor de $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ corresponde aproximadamente à menor flutuação que pode ser captada pelo ouvido humano na frequência de 1 kHz correspondendo ao limiar da audição [15, 16]. Na figura 2.4 são apresentados alguns valores da variação da pressão sonora e o correspondente nível de pressão sonora. Pode-se observar que o *limiar da audição* corresponde a uma situação de silêncio absoluto, o que é quase impossível de atingir. O *limiar da dor* pode ser atingido pela proximidade do ouvinte na decolagem de um avião a jato.

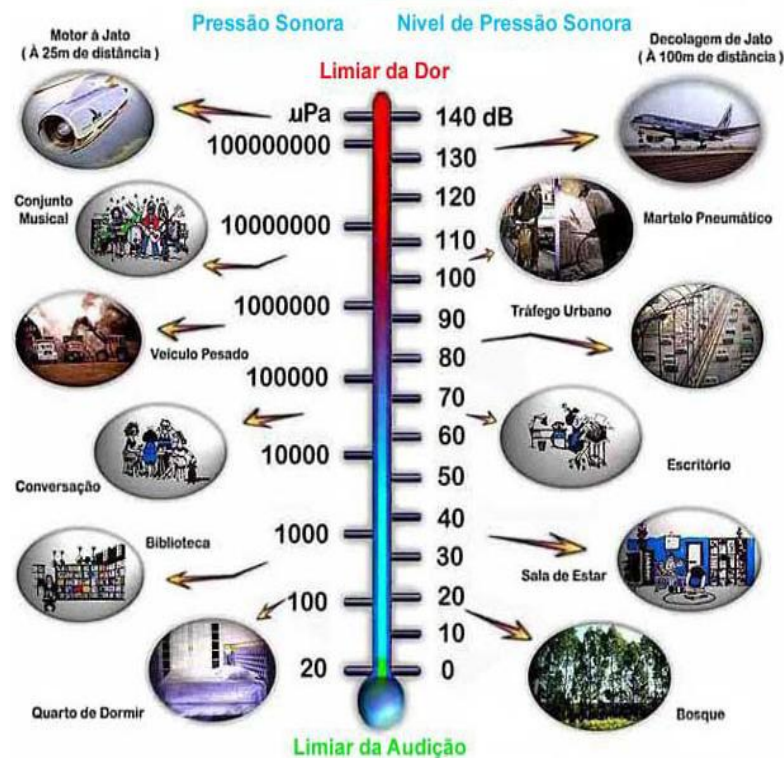


Figura 2.4 – Pressão sonora e nível de pressão sonora [17].

2.2.4. FREQUÊNCIA

A frequência de um som pode ser definida como sendo o número de variações da pressão por segundo. Ao tempo necessário para um ciclo ser completo é chamado de período [18]. O ser humano saudável nas suas capacidades máximas apresenta uma gama de audição entre os 20 e os 20.000 Hz (Figura 2.5) [13]. Esta gama de audição vai sofrendo encurtamentos pelo limite superior consoante o avançar da

idade [8]. A gama de valores analisada na Acústica de Edifícios é idêntica à gama de audição do ser humano e é dividida em três zonas de frequências:

- Frequências graves: 20 a 355 Hz
- Frequências médias: 355 a 1.410 Hz
- Frequências agudas: 1.410 a 20.000 Hz

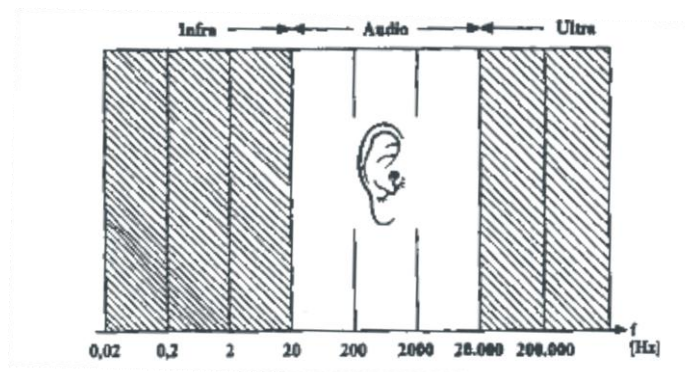


Figura 2.5 – Gama de audição do ser humano [3].

Através da audição de um ruído podemos com maior ou menor dificuldade classificá-lo consoante a sua frequência tendo como único “aparelho” de medição os ouvidos. Por exemplo, o som emitido por uma flauta soa agudo devido à presença maioritária de altas frequências, enquanto a tuba soa grave devido à presença maioritária de baixas frequências. Contudo, o ser humano não é capaz de distinguir pequenas diferenças de frequências. A capacidade de distinção vai-se deteriorando para as altas frequências [3].

Devido à imensa quantidade de frequências, convencionou-se agrupar as frequências por “bandas”. As bandas podem ter diversas larguras consoante o uso prático que se faz delas. Na Acústica de Edifícios são utilizadas unicamente as bandas de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava. A largura que a banda possui (B) é a diferença entre o valor de limite superior (f_2) e o limite inferior (f_1) (Figura 2.6).

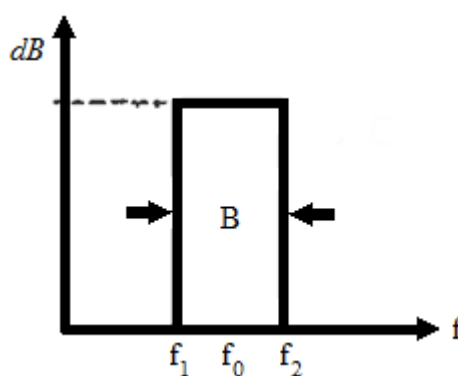


Figura 2.6 – Largura de banda $B = f_2 - f_1$ [3].

Estas frequências limites podem ser obtidas através da frequência central (f_0) que toma valores de: 16, 31, 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k e 16k Hz caso se trate da banda de 1/1 oitava ou então através da banda de 1/3 oitava que toma valores de: 20, 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400,

500, 630, 800, 1k, 1.250, 1.600, 2k, 2.500, 3.150, 4k, 5k, 6.300, 8k, 10k, 12.500, 16k e 20k Hz através das equações 2.7 e 2.8:

$$f_1 = f_0 \times 2^{-k/2} \quad (2.7)$$

$$f_2 = f_0 \times 2^{k/2} \quad (2.8)$$

Onde,

K=1 se a banda for de 1/1 oitava e k=1/3 se a banda for de 1/3 oitava.

O Acústica de Edifícios cinge, em geral, a sua análise na banda de frequências de 1/3 de oitava nas frequências dos 100 aos 3150 Hz.

2.2.5. CURVAS DE PONDERAÇÃO

As Curvas de Ponderação surgem como resposta ao fato de o ouvido humano não registar com igual fidelidade as pressões sonoras para qualquer frequência. Ou seja, caso o ser humano seja exposto a ruídos com a mesma intensidade sonora apresentará maior sensibilidade para os ruídos que se situem nas frequências próximas de 2.500 Hz e menor sensibilidade para as muito baixas e muito altas frequências (Figura 2.7) [3,19].

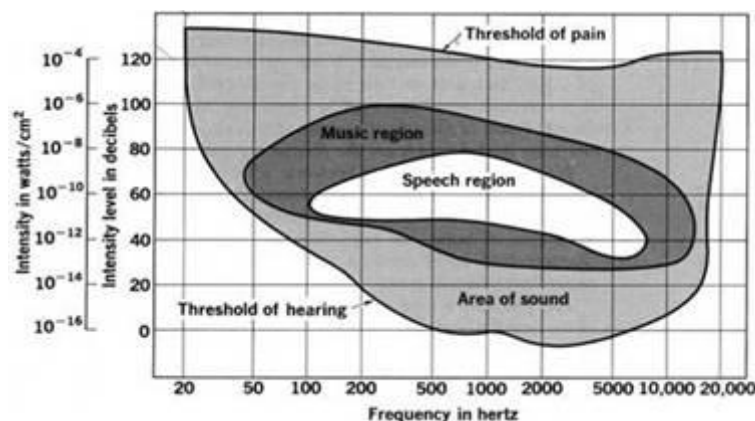


Figura 2.7 – Variação da frequência com gama auditiva [20].

Para descrever a resposta dada pelo ouvido humano aos ruídos, surgiram várias propostas para corrigir a sensibilidade dos equipamentos, recorrendo à introdução de filtros eletrónicos, de modo a que seja semelhante à do ouvido. Surgiram, assim, várias curvas que se designam pelas letras de A a D (Figura 2.8) [19].

A curva A é a mais utilizada para aproximar a resposta dos ouvidos aos ruídos de fraca intensidade (inferior a 55 dB), as curvas B e C são utilizadas para ruídos mais intensos (entre 55 a 85 dB e superior a 85 dB, respetivamente) e a curva D é utilizada para o ruído provocado pelos aviões [3].

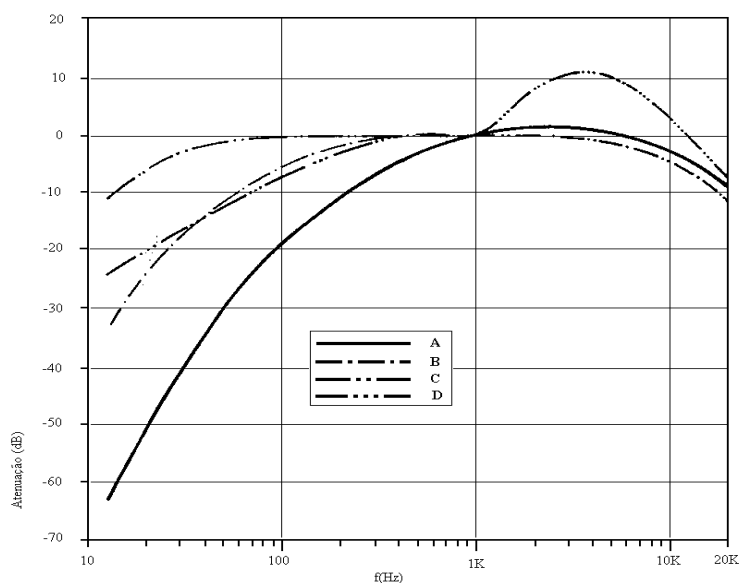


Figura 2.8 – Curvas de ponderação [19].

Atualmente a curva A é quase universalmente aceite, e a mais importante, pois é a que melhor correlaciona os valores medidos e a incomodidade provocada pelo ruído [21, 22]. Ao resultado do nível de pressão sonora, ao ser adicionado algebricamente o valor da curva A, respetivo a cada frequência, obter-se-á o nível sonoro do ruído em dB(A). Os valores de ponderação da curva A são apresentados no quadro 2.3 sobre a forma de bandas de frequência de 1/1 oitava e de 1/3 oitava.

Quadro 2.3 – Valores numéricos da curva de ponderação A para bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava [3].

Banda de frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 oitava (dB)	Ponderação A para 1/1 oitava (dB)
25	-44,7	
31	-39,4	-40
40	-34,6	
50	-30,2	
63	-26,2	-26
80	-22,5	
100	-19,1	
125	-16,1	-15,5
160	-13,4	
200	-10,9	
250	-8,6	-8,5
315	-6,6	

Quadro 2.3 – Valores numéricos da curva de ponderação A para bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava [3] (continuação).

Banda de frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 oitava (dB)	Ponderação A para 1/1 oitava (dB)
400	-4,8	
500	-4,8	-3
630	-3,2	
800	-0,8	
1.000	0	0
1.250	0,6	
1.600	1,0	
2.000	1,2	+1
2.500	1,3	
3.150	1,2	
4.000	1,0	+1
5.000	0,5	
6.300	-0,1	
8.000	-1,1	-1
10.000	-2,5	
12.500	-4,3	
16.000	-6,6	-7
20.000	-9,3	

2.2.6. NÍVEL SONORO CONTÍNUO EQUIVALENTE

O nível de pressão sonora contínuo equivalente (L_{eq}) é usado para descrever níveis de ruído que variam ao longo do tempo. Este parâmetro define-se como sendo o nível de pressão que, caso atuasse constantemente, durante um determinado período de tempo, produziria a mesma energia que um nível de pressão variável no tempo [3, 23] (Figura 2.9). O valor do nível de pressão sonora contínuo equivalente pode ser obtido através da expressão 2.9.

$$L_{eq} = 10 \times \log \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N t_i \times 10^{\frac{L_i}{10}} \right] \quad (2.9)$$

Onde,

T – Tempo total de medição dos ruídos;

t_i – tempo de medição de cada ruído;

L_i – Nível de pressão sonora de cada ruído.

É usual, na prática, apresentar os valores do nível de pressão sonora contínuo equivalente sobre a ação da curva de ponderação A, passando o novo parâmetro a designar-se por nível sonoro contínuo equivalente ponderado A, L_{Aeq} , expresso em dB. A título de exemplo, pode-se expressar o resultado das duas seguintes maneiras: $L_{Aeq} = 60$ dB ou $L_{eq} = 60$ dB(A), embora seja mais adequado expressar a letra A do lado esquerdo [24].

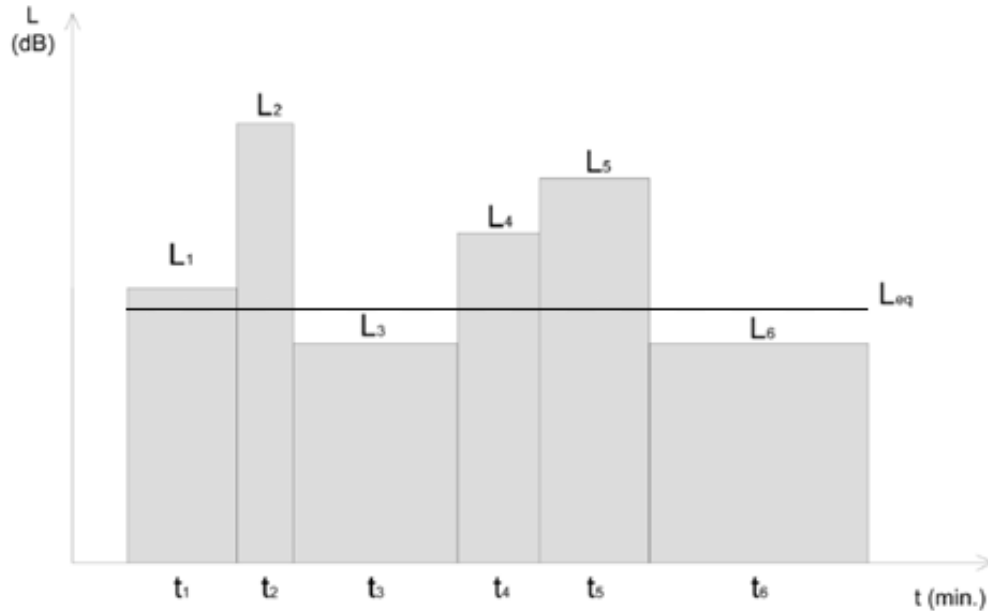


Figura 2.9 – Nível sonoro contínuo equivalente relativo a seis ruídos parcelares [25].

O parâmetro L_{Aeq} é também utilizado para a avaliação da dose de ruído a que um trabalhador está sujeito. Recorrendo à expressão 2.10, pode-se avaliar o nível de ruído durante um dia.

$$L_{EX,8h} = L_{Aeq,Te} + 10 \times \log \frac{T_e}{T_0} \quad [26] \quad (2.10)$$

$L_{EX,8h}$ – Exposição pessoal diária ao ruído (dB(A));

$L_{Aeq,Te}$ – Nível sonoro contínuo equivalente ponderado “A” (dB);

T_e – Tempo de exposição (min);

T_0 – Tempo de referência (480 min).

Os valores regulamentares em vigor correspondem a 8 horas de trabalho diário. O valor do ruído máximo semanal a que um trabalhador está sujeito pode ser calculado através da expressão 2.11.

$$\bar{L}_{EX,8h} = \frac{\sum_{k=1}^5 L_{(EX,8h)k}}{5} \quad (2.11)$$

$\bar{L}_{EX,8h}$ – Média semanal ao ruído (dB(A));

$L_{(EX,8h)k}$ – Exposição diária ao ruído (dB(A)).

Segundo o Decreto – Lei n.º 182/06 de 06 de Setembro [27] os valores limite de exposição, ação superior e inferior são os seguintes:

- Valor limite de exposição: 87 dB(A);
- Valor de ação superior: 85 dB(A);
- Valor de ação inferior: 80 dB(A).

2.3. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

2.3.1. CONCEITOS BÁSICOS

A inteligibilidade da palavra pode ser descrita como a percentagem de sílabas que são entendidas corretamente pelo ouvinte [28]. A inteligibilidade da palavra depende das características da fonte sonora em análise e das características do espaço físico envolvente.

A voz pode ser analisada sob quatro pontos de vista diferentes: frequência, intensidade, duração e direccionalidade.

A generalidade das fontes sonoras tende a emitir maior potência em determinada direção em detrimento das outras. Os sons das palavras que são emitidos com baixas frequências conseguem ter maior perceção na parte de trás do orador do que as palavras que são emitidas com altas frequências [5]. Este fato advém da capacidade das ondas de baixas frequências em ultrapassar obstáculos devido ao seu maior comprimento de onda comparativamente às ondas de alta frequência. Nas salas de aula, o ser humano assume-se como sendo a principal fonte sonora e como tal a inteligibilidade da palavra vai depender muito das características da voz do orador. Como já foi referido as fontes sonoras tendem a emitir preferencialmente numa direção, e o ser humano não é exceção, emitindo o som preferencialmente para a sua frente [3]. A duração depende da letra emitida. As vogais têm uma duração de aproximadamente 90 ms e as consoantes têm uma duração de cerca 20 ms. A intensidade também varia caso se trate de uma vogal ou consoante, tratando-se de um som mais intenso ou mais débil, respetivamente [3, 5]. A frequência varia num domínio bastante vasto, podendo ir do som com mais baixa frequência (u) até à mais alta frequência (s). No quadro 2.4 são resumidas as características mais importantes das vogais e consoantes.

Quadro 2.4 – Características mais importantes das vogais e consoantes [1, 3].

Tipo	Duração (ms)	Zona de Frequência	Nível Intensidade	Contribuição para a Inteligibilidade da Palavra
Vogais	90	Baixas	Elevado	Baixa
Consoantes	20	Altas	Baixo	Alta

Relativamente às características do espaço físico, a inteligibilidade encontra-se dependente de fatores como o tempo de reverberação, ruído de fundo, geometria da sala, etc. No caso de estudo presente importa analisar com maior importância o efeito que o ruído de fundo, neste caso equipamentos AVAC, provoca na compreensão da palavra. O ruído provocado pelos equipamentos AVAC além de não permitir uma boa inteligibilidade, pode afetar as capacidades de concentração dos indivíduos utilizadores destes espaços. Na avaliação da inteligibilidade da palavra pode-se recorrer a parâmetros objetivos e/ou subjetivos. Neste trabalho optou-se por analisar a inteligibilidade da palavra através de parâmetros objetivos.

2.3.2. PARÂMETROS OBJETIVOS DE MEDIDA DA INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

2.3.2.1. AI – Índice de Articulação

O índice de articulação ou *articulation index* (AI) foi desenvolvido por French e Steinberg em 1947 [29] e por Fletcher e Galt em 1950 [29]. Este método foi desenvolvido para prever a capacidade de percepção do discurso por pessoas normais, sujeitas a um ambiente com determinado ruído de fundo presente.

Este método é calculado com base no nível de conversação face ao ruído de fundo em determinado compartimento. Para isso medem-se os valores do nível de pressão sonora do ruído de fundo para cada uma das cinco bandas de 1/1 de oitava, nas frequências entre os 250 e 4.000 Hz, ou para uma análise mais precisa considera-se os valores das quinze bandas de 1/3 de oitava, nas frequências entre 200 e 5.000 Hz. A diferença do nível de conversação com o ruído de fundo não deve ultrapassar o valor de 30 dB para cada banda de frequência. Caso isso aconteça o valor da diferença deve ser substituído por 30 dB. Em seguida é feita a ponderação da diferença entre o nível de conversação e o ruído de fundo com o peso relativo a cada frequência, sendo somados todos os valores resultantes desta operação. O Índice de Articulação é o resultado da divisão do somatório anterior por 10.000. No 2.5 são apresentados os valores dos níveis de conversação e dos pesos relativos a cada frequência para as bandas de 1/1 e 1/3 de oitava. [3, 30, 31].

Quadro 2.5 – Valores dos níveis de conversação e dos pesos relativos a cada frequência para bandas de 1/3 e 1/1 de oitava [32].

1/3 de oitava			1/1 de oitava		
Freq. (Hz)	Nível de conversação	Peso	Freq. (Hz)	Nível de conversação	Peso
200	67	4			
250	68	10	250	72	18
315	69	10			
400	70	14			
500	68	14	500	73	50
630	66	20			
800	65	20			
1000	64	24	1000	78	75
1250	62	30			
1600	60	37			
2000	59	37	2000	63	107
2500	57	34			
3150	55	34			
4000	53	24	4000	58	83
5000	51	20			

A classificação do AI varia entre 0 (compreensão nula) a 1 (compreensão perfeita). No quadro 2.6 são apresentados alguns valores de classificação da inteligibilidade e da privacidade da palavra.

Quadro 2.6 – Relação entre Índice de Articulação, grau de privacidade e grau de inteligibilidade [3].

AI (Índice de articulação)	Grau de privacidade	Grau de inteligibilidade
< 0,05	Confidencial	Nula
[0,05 – 0,20[	Normal	Muito fraca
[0,20 – 0,35[	Marginal	Fraca
[0,35 – 0,40[	Pobre	Sofrível
[0,40 – 0,65[	Em geral, sem privacidade	Boa
≥ 0,65	Inexistente	Excelente comunicação

2.3.2.2. RASTI

O RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) foi desenvolvido em cooperação com a empresa Brüel & Kjaer e tem como finalidade medir a inteligibilidade da palavra. A função de transferência de modulação é calculada em duas bandas de frequências: 500 e 2000 Hz que são essenciais para a inteligibilidade da palavra e para a seleção da modelação da frequência [33]. Trata-se de uma simplificação do método STI (*Speech Transmission Index*) e é utilizado um equipamento constituído por um emissor e um recetor.

Este método tem em conta as características da voz humana e correlaciona o sinal recebido com a inteligibilidade da palavra. O modo de medição deverá ser feito recorrendo a várias medições em diferentes posições e mais que uma vez em cada posição para garantir fiabilidade [34]. Os valores obtidos poderão ser correlacionados com a inteligibilidade da palavra através do quadro 2.7 em que 0 significa uma inteligibilidade nula, e 1 significa uma ótima inteligibilidade [35].

Quadro 2.7 – Relação entre o valor de RASTI e o grau de inteligibilidade da palavra [36].

RASTI	Grau de inteligibilidade da palavra
[0 – 0,30[	Má
[0,30 – 0,45[	Fraca
[0,45 – 0,60[	Razoável
[0,60 – 0,75[	Boa
[0,75 - 1]	Excelente

2.3.2.3. SIL

O SIL (*Speech Interference Level*), tal como o AI, foi desenvolvido com o propósito de caracterizar objetivamente a inteligibilidade da palavra. Para tal, este método compara valores limites com a média dos valores dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo por banda de oitava nas frequências de

500, 1k, 2k e 4k Hz dependendo da distância entre orador e ouvinte. Este método foi normalizado pela ANSI S.3.14 de 1977, entretanto já revista pela ANSI S.12.65 de 2006 [37].

No entanto em 1967, Webster propôs uma ligeira modificação ao método de forma a considerar apenas as bandas de frequências de 500, 1k e 2 k Hz. Passando o índice a designar-se de PSIL (*Preferred Speech Interference Level*) [38].

$$PSIL = RF_{500\text{ Hz}} + RF_{1\text{ kHz}} + RF_{2\text{ kHz}} \quad (\text{dB})$$

Os valores máximos de PSIL para que a comunicação da palavra seja no limite possível são apresentados no quadro 2.8.

Quadro 2.8 – Valores máximos de PSIL (dB) para que a comunicação seja no limite possível (M: Masculino; F: Feminino) [adaptado de 3, 32, 37].

Distância (m)	PSIL (dB)							
	Esforço de Voz							
	Normal		Elevado		Muito alto		Gritando	
	M	F	M	F	M	F	M	F
0,3	68	63	74	69	80	75	86	81
1,0	58	53	64	59	70	65	76	71
2,0	52	47	58	53	64	59	70	65
3,0	48	43	54	49	60	55	66	61
4,0	46	41	52	47	58	53	64	59
6,0	43	38	49	44	55	50	61	56
8,0	40	35	46	41	52	47	58	53
9,0	39	34	45	40	51	46	57	52
10,0	39	34	45	40	51	46	57	52
12,0	37	33	43	38	49	44	55	50
13,0	36	31	42	37	48	43	54	49
16,0	34	29	40	35	46	41	52	47
22,0	32	27	38	33	44	39	50	45

2.4. CURVAS DE INCOMODIDADE

Os equipamentos de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC) instalados na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto são elementos provocadores de ruído de fundo. As curvas de incomodidade têm como finalidade avaliar o ruído de fundo nos locais mais ruidosos de cada sala de

aula e compará-los com valores de referência previamente definidos, através da sobreposição das curvas geradas de medição dos níveis de pressão sonora com as curvas de referência. Estas curvas devem ser utilizadas apenas para a medição de ruídos de fundo estáveis e contínuos [3, 18, 39].

De entre as várias curvas de incomodidade existentes, as abordadas nesta dissertação são as curvas NC (*Noise Criteria*) e NR (*Noise Rating*). O modo de cálculo utilizado é semelhante para as duas, e é feito com recurso ao “método da tangente” que significa que a curva escolhida é a menor curva que não é excedida por nenhum nível de pressão sonora nas bandas de 1/1 oitava [3].

As curvas NC (Figura 2.10) foram propostas por Leo Beranek em 1957 e foram desenvolvidas com base em questionários realizados às pessoas que trabalhavam em locais que possuíam equipamentos de ar condicionado. Cada curva possui oito bandas de 1/1 oitava entre os 63 Hz e os 8 kHz e reflete o resultado do estudo de modo a privilegiar a inteligibilidade da palavra [3, 39].

Os valores máximos limite recomendados para as curvas *Noise Criteria* em função de alguns tipos de compartimentos são os apresentados no quadro 2.9.

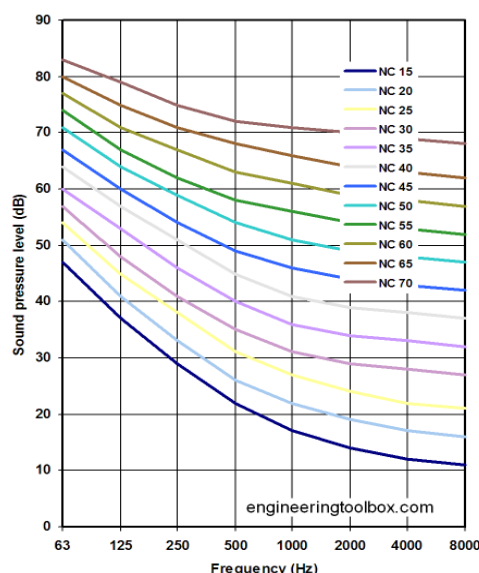


Figura 2.10 – Curvas *Noise Criteria* [40].

Quadro 2.9 – Valores máximos recomendados para as curvas NC para diferentes tipos de compartimentos [adaptado de 8].

Tipos de Compartimentos	NC
Salas de concerto, ópera	20-25
Salas de aula, salas de teatro, igrejas	25-30
Cinemas	30-35
Enfermarias e salas de cirurgia, habitações	25-35
Bibliotecas, tribunais	30-35
Restaurantes, bares, cafés	35-45
Recintos desportivos e piscinas	35-50

As curvas NR (Figura 2.11) foram propostas por Kosten e Van Os. e são muito parecidas às curvas NC. Estas curvas abrangem mais uma banda de frequência, situando-se entre os 32 e os 8k Hz e foram institucionalizadas em 1971 por uma norma ISO.

Os valores máximos limite recomendados para as curvas *Noise Rating* em função de alguns tipos de compartimentos são os apresentados no quadro 2.10.

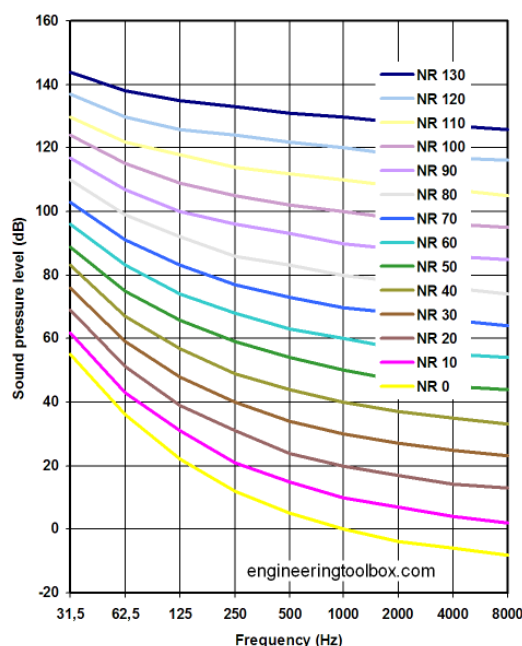


Figura 2.11 – Curvas *Noise Rating* [41].

Quadro 2.10 - Valores máximos recomendados para as curvas NR para diferentes tipos de compartimentos [adaptado de 8].

Tipos de Compartimentos	NR
Salas de concerto, teatros	20-25
Estúdios de televisão, grandes salas de conferência	20-30
Cinemas, hospitais, pequenas salas de conferência, salas de aula	25-35
Escritórios, bibliotecas, tribunais	30-40
Restaurantes, bares, cafés	35-45
Ginásios	40-50
Oficinas, centros de reparação automóvel	50-55

2.5. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O Tempo de Reverberação de um compartimento é o intervalo de tempo medido em segundos, que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB, a partir do momento em que uma fonte sonora pára de emitir [3, 18]. Num compartimento, tal como o caso das salas de aula, o som que chega aos recetores é

devido a ondas sonoras diretas e refletidas. As ondas diretas são os percursos em linha reta das ondas sonoras desde o emissor até ao recetor sem a existência de nenhum obstáculo pelo caminho, e as ondas refletidas, são ondas que chegam ao recetor depois de “embaterem” em superfícies e serem “obrigadas” a mudar de direção (podem ser reflexões únicas ou múltiplas) [3]. Qualquer som dentro de salas de aula será sempre ouvido devido a ondas sonoras diretas e refletidas. As ondas sonoras refletidas vão chegando cada vez mais fracas aos ouvidos dos recetores, devido às absorções causadas pela envolvente e por todos os elementos que possuam absorção, tais como pessoas, mesas, cadeiras, etc. e também pela absorção do ar [3, 42].

Na prática conseguir atingir um decaimento de 60 dB é quase impossível devido ao fato de o ruído de fundo, na maioria das vezes, se sobrepor à “extinção” do som emitido [3]. Torna-se por esse motivo necessário recorrer a uma extrapolação dos valores obtidos para decaimentos de 20 ou 30 dB, e adaptá-los para decaimentos de 60 dB. Nestes casos o tempo de reverberação denomina-se de T20 e T30, respetivamente. A figura 2.12 representa um exemplo do tempo de reverberação para um decaimento de 30 dB.

O Tempo de Reverberação ideal de cada local torna-se portanto variável consoante a função a que este se destina. No caso de estudo (salas de aula) a situação ideal é que o tempo de reverberação seja baixo, de modo a que a conversação seja inteligível, sem provocar fadiga no orador e nos ouvintes. Um elevado tempo de reverberação faz com que o superior nível sonoro de emissão das vogais e seu maior tempo de duração relativamente às consoantes, mascare as palavras provocando uma redução da inteligibilidade da palavra.

Já nas salas de espetáculos de música sinfónica o objetivo é que o tempo de reverberação seja um pouco mais elevado do que nas salas de aula de forma a haver uma harmonia entre as notas emitidas [3, 18, 42].

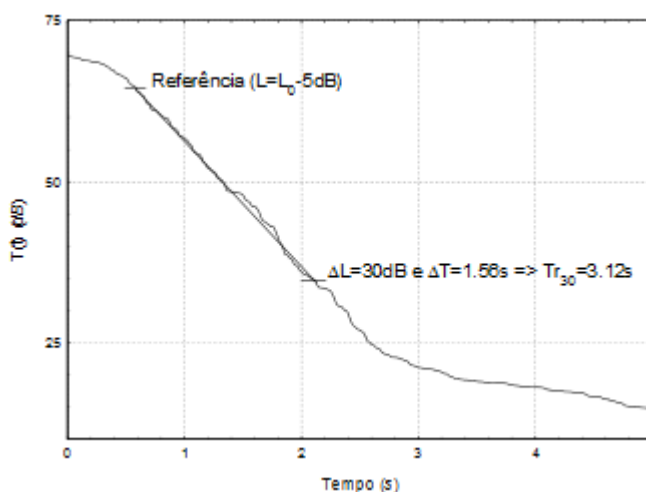


Figura 2.12 – Exemplo do tempo de reverberação para um decaimento de 30 dB [42].

Várias foram as formulações realizadas por diversos autores de forma a prever o tempo de reverberação. A mais conhecida foi a realizada pelo físico americano Wallace Clement Sabine, professor na Universidade de Harvard, Boston, que chegou à relação existente entre Absorção Sonora, Volume e Tempo de Reverberação. Segundo Sabine define-se o tempo de reverberação como sendo:

$$T = \frac{0,16 \times V}{A} \quad (2.12)$$

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times S_i \quad (2.13)$$

Onde,

T – tempo de reverberação (s);

V – volume do compartimento (m³);

A – Absorção sonora equivalente (m²);

α_i - coeficiente de absorção sonora do material;

S_i - superfície real do material (m²).

3

EQUIPAMENTOS AVAC

3.1. INTRODUÇÃO

Os equipamentos de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC) foram desenvolvidos de modo a proporcionar um maior conforto do ambiente interior durante todo o ano. Estes equipamentos eram inicialmente vistos como um luxo, mas rapidamente esta ideia desapareceu e passaram a ser vistos como equipamentos essenciais de modo a garantir uma vida mais saudável e produtiva.

Os primeiros tipos de equipamentos AVAC desenvolvidos tinham altos consumos de energia, visto aquando a sua data de conceção não haver grande preocupação com este tema devido aos baixos preços dos recursos naturais. Devido ao progressivo consumo dos recursos naturais, tornou-se essencial aumentar a eficiência de modo a ser viável a utilização destes equipamentos relativamente ao fator custo.

Cada vez mais os profissionais responsáveis pelos equipamentos de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC) são confrontados com a necessidade de melhorarem estes equipamentos de forma a serem capazes de dar resposta à crescente exigência de manter os ambientes interiores de espaços como laboratórios, hospitais e instalações industriais sobre determinados níveis termo-higrométricos. As ferramentas e os métodos ao dispor destes especialistas estão constantemente a serem aperfeiçoadas e, com o crescente estudo nesta área, vão sendo cada vez mais correlacionáveis os parâmetros que estão relacionados com o conforto interior [43].

3.2. NECESSIDADE DOS SISTEMAS AVAC

O ar-condicionado foi desenvolvido com o intuito de proporcionar um ambiente interno mais estável durante os meses quentes do ano através da refrigeração e controlo da humidade.

Atualmente a necessidade de proporcionar um ambiente termo-higrométrico mais estável, não só nos meses quentes como também nos meses de frio, levou à necessidade de alargar o termo ao aquecimento, arrefecimento, controlo da humidade e ventilação. Estas exigências são protagonizadas pelos ocupantes dos espaços com este tipo de equipamentos. Em 1902 Willis Carrier, um dos pioneiros na temática do ar-condicionado, conseguiu conceber equipamentos que reduzem a humidade do ar e conseguem mantê-la sobre determinado nível. Este feito marca o nascimento do controlo ambiental interior tal como hoje se conhece. A partir desta data o processo de desenvolvimento foi rápido, visto estes tipos de equipamentos virem a ganhar um papel cada vez mais importante na sociedade, pois permitem melhorar a qualidade de vida.

Hoje em dia as preocupações ambientais estão em linha de foco e tais como todos os produtos, os equipamentos AVAC vão sofrendo necessidades de alterações de modo a conseguir dar resposta às

restrições impostas pelas autoridades. Temáticas como o aquecimento global levam à necessidade de se impor restrições quanto a materiais e métodos de modo a minimizar os efeitos negativos que estes produtos podem ter para a natureza.

Estes equipamentos além das restrições ambientais são também alvos de melhoria por parte das exigências dos consumidores, que requerem cada vez mais conforto, sendo necessário implementar estes equipamentos logo na fase projeto e estabelecer técnicas de manutenção.

Um fato de relevo é que o mau desempenho dos equipamentos AVAC pode afetar os ocupantes, levando a que estes desenvolvam alergias e doenças, sendo por este motivo reforçada a ideia da necessidade de melhoria destes equipamentos [43].

Um sistema AVAC deve ser capaz de assegurar funções de aquecimento, humificação, arrefecimento, desumificação, filtragem e ventilação. Estas funções são descritas de seguida de forma breve de modo a proporcionar ao leitor um melhor enquadramento com o tema.

a) Aquecimento

O Aquecimento é a transferência de energia de um corpo para outro provocado pela sua diferença de temperatura. Este processo pode ocorrer por radiação, convecção ou condução. Este tipo de aumento de temperatura do ar denomina-se por carga sensível.

b) Arrefecimento

O Arrefecimento consiste na operação inversa do aquecimento, o qual é obtido pela circulação do ar junto a uma superfície com temperatura reduzida, removendo o calor para outro espaço.

c) Humificação

A Humificação consiste no processo de transferência de água para o ar, transformando-a em vapor de água. Este processo denomina-se por carga latente devido à transferência de calor estar associada à transferência de massa. Ou seja, consiste na quantidade de calor necessário para mudar o estado físico de uma substância.

d) Desumificação

A Desumificação consiste na operação inversa da humificação. Esta função assegura a remoção do vapor de água do ar. Este processo pode ser obtido fazendo circular o ar ao longo de uma de uma superfície fria, fazendo com que o vapor de água condense sobre a superfície.

e) Filtragem

A Filtragem consiste no processo de limpeza do ar e por vezes na desodorização do ar. Este processo consiste na filtragem de partículas sujas.

f) Ventilação

A ventilação consiste no processo de trocas de ar o qual deverá ser forte o suficiente para remover a energia produzida pelos ocupantes, mas suficientemente suave para passar despercebido. A entrada de ar no espaço a ser ventilado é feita através de grelhas de entrada que utiliza vários dispositivos de distribuição de ar [44].

3.3. IMPORTÂNCIA DA CLIMATIZAÇÃO

Em espaços fechados, como é o caso das salas de aula, a energia libertada por pessoas, equipamentos e aparelhos, eleva a temperatura do ar dentro destes espaços. Com a presença de pessoas existe

indispensavelmente a produção de dióxido de carbono, libertação de vapor de água pela respiração e possivelmente a formação de odores. Se analisada a qualidade do ar interior das salas de aula nos meses mais quentes, sem a interferência de nenhum processo de melhoria, estas facilmente apresentariam uma temperatura do ar interior bastante elevada, apresentado uma concentração de gases poluentes e de partículas inaceitável. Por sua vez, se analisado o mesmo tema, mas desta feita no Inverno, as perdas de calor pela envolvente poderiam ser elevadas e consequentemente levar a um arrefecimento significativo do ar interior caso a envolvente apresente condições de retenção da temperatura baixas. Em qualquer uma das situações, o conforto destas salas poderia ser afetado negativamente consoante o tipo de atividade e duração a realizar nestes espaços.

Se a sala for ventilada, existirá a entrada de ar novo, o que reduzirá fortemente a concentração de gases e vapores libertados. O ar novo permite, para além de baixar o nível de partículas em suspensão no ar, reduzir a temperatura interior, caso a temperatura exterior seja inferior à interior. No caso da temperatura exterior ser inferior à interior, o ar novo levará ao arrefecimento da sala, reduzindo a temperatura interior e provocando desconforto.

Os ganhos ou perdas de calor designa-se por cargas térmicas e são obtidos através da dissipação da carga térmica num líquido ou gás que atravesse o local. O líquido ou gás toma a designação de fluído e remove ou cede calor consoante as condições internas pretendidas. O fluído pode ser aquecido ou arrefecido caso se pretenda ganhos ou perdas de calor, respetivamente, e deve ser repostado de novo nas condições iniciais, ou seja, antes de entrar em funcionamento para ser passível de nova utilização. Este processo é o normalmente utilizado pelos sistemas de climatização.

Existem no mercado diversos tipos de equipamentos constituintes de uma instalação de climatização tais como: caldeiras, bombas de calor, unidades de arrefecimento de ar, painéis solares, equipamentos de cogeração, etc. No entanto existem soluções passivas, tais como soluções utilizadas atualmente em algumas aplicações militares e aeroespaciais com muito reduzida comercialização como as pilhas de combustível a ácido fosfórico, as de PEM (*Polymer Electrolyte Membrane*) e geradores termoelétricos. Estas soluções apesar de não terem uma utilização generalizada, no futuro poderão vir a ser bastante importantes com o desenvolvimento de novos materiais.

Os sistemas de climatização para além de garantir uma determinada temperatura no local, têm ainda capacidade de gerir a humidade e a qualidade do ar. Compete a estes sistemas garantir concentrações de poluentes nulas ou quase nulas, de modo a que a saúde humana nunca seja posta em causa. A remoção de gases poluentes ou odores é realizada pela ventilação e o controlo da humidade do ar obriga, por vezes, a que o ar novo, a ser introduzido, seja humidificado ou desumidificado antes de introduzido no local.

A remoção dos poluentes é obtida através da introdução de ar novo, em que este é aquecido ou arrefecido e humidificado ou desumidificado consoante as condições interiores que se pretendem atingir. O ar novo não é mais que ar exterior modificado pelas operações anteriormente referidas.

A remoção dos poluentes processa-se através da filtragem das partículas em suspensão no ar, enquanto a remoção de humidade pode ser obtida através do arrefecimento do ar até uma temperatura inferior à temperatura de orvalho do ar. A humidificação pode ser obtida através da injeção de vapor.

A conceção e o sistema de climatização escolhidos farão variar o consumo energético necessário para se obterem condições agradáveis à atividade humana [45].

3.4. SISTEMAS AVAC

3.4.1. TIPOS DE SISTEMAS INSTALADOS

Os sistemas AVAC, dependendo da área servida e do local onde é inicialmente produzido o calor ou frio, podem ser classificados em sistemas centralizados ou individuais. Os sistemas centralizados podem ainda ser classificados quanto ao tipo de fluido térmico (fluido secundário) utilizado. Estes dividem-se em três tipos base de sistema: tudo-ar, tudo-água, ar-água.

A classificação em função do fluido térmico de circulação pode ser generalizada aos sistemas não centralizados, sendo este grupo definido pelo tipo “tudo-refrigerante”. Neste tipo de sistema o fluido circulante em todo o sistema é o “refrigerante” (fluido frigorigéneo) [45].

A Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), utiliza o sistema centralizado e o sistema individual nas suas instalações. O controlo da climatização é realizado pela gestão técnica centralizada da faculdade e a ventilação é regulada de forma individualizada para cada sala de aula. A descrição de cada sistema e do fluido de circulação é realizada de seguida, bem como a identificação dos espaços que utilizam cada um destes sistemas.

3.4.2. SISTEMA CENTRALIZADO – UTA’S

3.4.2.1. Caracterização das UTA’s

As Unidades de Tratamento de Ar (UTA’s) são o tipo sistema de climatização utilizado nas salas de aula do Edifício B, excluindo-se as salas 001, 002 e 003 (ver figura 3.7), e são constituídas por uma série de componentes ligados entre si através de uma dada sequência. Entre os elementos constituintes destes tipos de aparelhos podem estar: ventiladores, bombas, baterias de aquecimento, bateria de arrefecimento, lavador de ar ou injetores, caixa de mistura, recuperador de calor sensível ou entálpico, válvulas e controlo.

Este tipo de sistema serve para fazer quase todo o controlo do ar, garantindo a capacidade de regular uma dada temperatura e ventilação, mas sem a capacidade de regularizar a humidade. Existem assim módulos que permitem o aquecimento através de água utilizada como fluido térmico que circula numa bateria de aquecimento e outro módulo que funciona como ventilação.

As UTA’s são classificadas como um sistema centralizado. Este tipo de sistema é utilizado quando se pretende servir uma grande parte do edifício, encontrando-se o circuito primário na zona técnica à qual só tem acesso o pessoal responsável pela manutenção do sistema (Figura 3.1). O sistema centralizado, utiliza um fluido térmico que circula no sistema secundário para realizar a climatização dos locais. Estes tipos de sistemas podem ser analisados quanto ao tipo de fluido secundário utilizado. O caso presente na FEUP considera um tipo base de sistema ar-água.

Neste tipo de sistema ar-água, como o próprio nome indica, são utilizados estes dois fluidos térmicos simultaneamente. O tipo de sistema pode variar consoante a repartição do aumento da carga térmica seja efetuada pela água e pelo ar. O tipo de sistema mais utilizado baseia-se no aumento da carga térmica interior, através do circuito de água, e no fornecimento ou remoção de energia ao ar exterior, para o colocar em condições ideais antes de o insuflar para a sala. As figuras 3.2 e 3.3 mostram uma caixa de insuflação e de extração. Estas caixas fazem respetivamente a admissão de ar e a sua extração. Este tipo de solução toma normalmente a designação de “ar neutro”. Na prática o que o

sistema faz é utilizar uma pequena variação de temperatura (aproximadamente 2 °C) no ar a insuflar, aquecendo-o ou arrefecendo-o, de acordo com as intenções pretendidas [45].

As características técnicas das unidades de tratamento de ar utilizadas na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto são as apresentadas no quadro 3.1.



Figura 3.1 – Zona técnica de Unidade de Tratamento de ar na FEUP. [Foto do autor]

Quadro 3.1 – Características dos equipamentos de Unidades de Tratamento de Ar instalados na FEUP.

Insuflação		Admissão/ Mistura	
Modelo	MBd1	Caixa de Mistura	3 Vias
Ventilador	DD 11-11 ECMd1 1/1	Extração	
Velocidade	1120 RPM	Ventilador	DD 11-11 ECMd1 1/1
Bateria Aquecimento	MB 30 2R	Velocidade	814 RPM
Filtragem		Opcionais	
Filtro Primário	EU4	Servomotor	



Figura 3.2 – Caixa de insuflação de ar na FEUP.
[Foto do autor]



Figura 3.3 – Caixa de extração de ar na FEUP.
[Foto do autor]

3.4.2.2. PROBLEMA TÍPICOS NAS UTA'S E POSSÍVEIS SOLUÇÕES

A figura 3.4 apresenta os erros típicos de conceção relacionados com problemas acústicos que a Unidades de Tratamentos de Ar normalmente ostentam. A maior parte dos problemas nestes equipamentos deve-se ao fato de não haver uma adequada seleção, aplicação e instalação dos componentes.

O ar que circula na canalização pode provocar uma excessiva turbulência devido às velocidades de funcionamento das lâminas constituintes dos ventiladores só projetarem o ar contra as condutas. O ruído originado por esta turbulência do ar, depende da velocidade de funcionamento dos ventiladores, pois quanto maior a velocidade maior será o ruído. Outros problemas devem-se ao fato dos equipamentos muitas vezes não terem apoios anti-vibráteis e muitas vezes os que têm serem instalados em pavimentos flexíveis, o que anula a sua função [46].

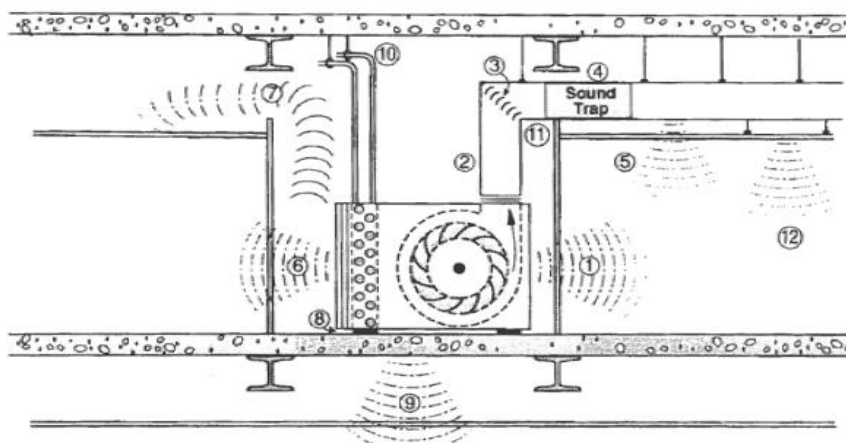


Figura 3.4 – Problemas típicos nas UTA's [46].

- 1) A colocação de uma parede de pouca espessura perto do motor do ventilador não funciona como barreira acústica protetora de ondas de baixa frequências em relação aos espaços adjacentes;
- 2) A rotação anti-horária do ventilador faz com que o ar seja expelido a maior velocidade contra o cotovelo da conduta provocando maior turbulência e consequentemente ruído de baixa frequência;
- 3) A colocação de um cotovelo pequeno na conduta faz com que os problemas acima referidos sejam agravados;
- 4) A colocação de *sound trap*¹ demasiado perto do cotovelo agrava os problemas de turbulência;
- 5) A utilização de dutos retangulares e *sound trap*'s aumentam o ruído provocado pelo fluxo do ar;
- 6) A colocação da entrada de ar do equipamento muito próxima da parede leva o ventilador a funcionar de forma irregular, surtindo assim variações no ruído produzido;
- 7) O não tratamento acústico das salas que contêm as unidades de tratamento de ar permite que o ruído produzido nestas salas se propague através do teto para os espaços adjacentes;
- 8) Utilização inadequada de apoios anti-vibráteis entre o piso e a máquina. Apoios demasiados rígidos perdem o seu propósito;
- 9) Utilização de lajes pouco rígidas;
- 10) A ligação das tubagens às paredes e lajes não serem realizadas por apoios anti-vibráteis;
- 11) A colocação de uma parede em contacto direto com o duto ou com o *sound trap* faz com que esta funcione como uma caixa-de-ressonância emissora de ruído de baixas frequências;
- 12) O contato entre dutos e o teto faz com que este funcione como uma superfície irradiadora de ruído [46].

No entanto estes problemas podem ser minimizados se houver uma correta instalação dos componentes (figura 3.5) [46].

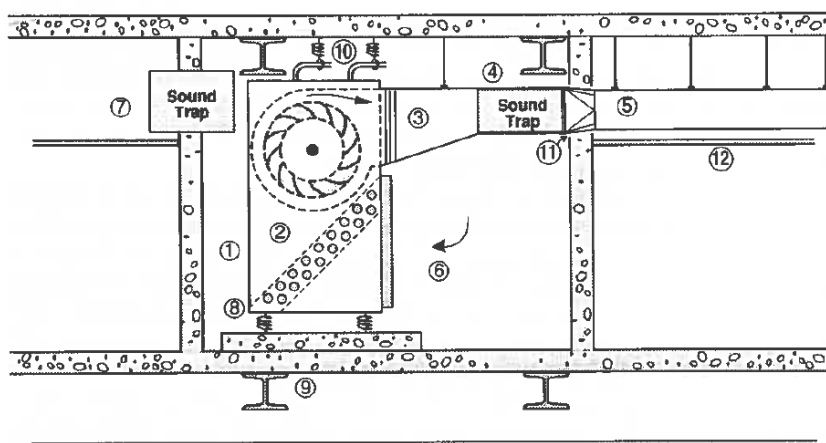


Figura 3.5 – Montagem correta de uma UTA [46].

¹ *Sound Trap* – tipo de tratamento acústico utilizado em condutas constituintes de equipamentos AVAC, que tem como finalidade reduzir a transmissão ruído nos dutos.

- 1) Distanciar o equipamento da parede no mínimo de 60 cm. A utilização de uma parede de alvenaria beneficia o isolamento a ondas sonoras de baixas frequências;
- 2) Disposição do ventilador na continuidade das condutas de modo a não ser necessário a utilização de um duto com cotovelo;
- 3) A utilização de um duto de seção variável gradual minimiza a turbulência;
- 4) A utilização correta de *sound trap's* reduz o ruído e a turbulência;
- 5) Condutas de forma circular diminuem a transmissão de ondas sonoras de baixa de frequência para o espaço ocupado;
- 6) Distanciar o equipamento da parede de separação com o espaço ocupado evita turbulência excessiva;
- 7) A utilização de *sound trap's* no caminho de entrada de ar reduz o ruído no compartimento do equipamento;
- 8) Utilização de isolamento anti-vibratório na separação do equipamento com a estrutura de suporte;
- 9) Utilização de uma laje de inércia sobreposta à laje onde o equipamento assenta, aumenta a rigidez do elemento estrutural fazendo diminuir a transmissão de ruído e vibração;
- 10) Os tubos constituintes das UTA's são suspensos no teto através de ganchos com isolamento anti-vibrações;
- 11) Colocação de um vedante mole em toda a superfície da conduta de forma a que esta não toque na parede;
- 12) Utilização de um teto suspenso sem contacto com as condutas.

De forma a minimizar os problemas de ruído e vibração destes tipos de equipamentos deverão ser seguidos os seguintes passos na fase de projeto [46]:

- 1) Selecionar o tipo e tamanho de UTA mais eficiente para a sua função;
- 2) Selecionar ventilador de modo a que este não tenha que trabalhar na sua potência máxima;
- 3) Deixar um espaço para uma roldana de ventilação na conduta de entrada e um espaço de uma roldana e meia na conduta de saída;
- 4) Usar apoios anti-vibráteis nos ventiladores com potência superior a 0,7 kW que estejam situados perto de zonas sensíveis ao ruído;
- 5) Utilizar material acusticamente absorvente na ligação das condutas aos ventiladores;
- 6) As condutas de entrada e saída das UTA's não devem apresentar ângulos superiores a 15 graus;
- 7) Todos os elementos constituintes das UTA's devem ser projetados para as frequências mais baixas;
- 8) A área da sala da UTA deverá ter de 2 a 3 metros quadrados por cada 1000 litros de fluxo necessário;
- 9) As portas das salas onde estão situadas as UTA's deverão pesar pelo menos 25 kg/m², estando completamente celadas e deverão abrir para fora, para que a pressão interior seja negativa e contribua para o seu estaqueamento.

3.4.3. SISTEMA INDIVIDUAL – *ROOFTOP*

3.4.3.1. Caracterização dos *Rooftop's*

Os *Rooftop* são equipamentos de climatização que são especialmente desenhados para serem instalados nas coberturas dos edifícios (Figura 3.6).

Estes equipamentos podem servir muitos locais ou então diretamente só um local. No caso da FEUP cada equipamento *Rooftop* faz o abastecimento de uma sala. Existem três equipamentos *Rooftop*, cada um deles, dirigido respetivamente para as salas B 001, B 002 e B 003 (Figura 3.7)

O aquecimento do ar é obtido através do contato com a superfície de baterias alimentadas por um fluído refrigerante. Estes tipos de sistemas são classificados como sendo de expansão direta de um fluído refrigerante.

Devido à inexistência de uma válvula de inversão do circuito de fluído refrigerante, este tipo de equipamentos só consegue realizar aquecimento. Estes aparelhos operam devido à bateria funcionar como uma bomba de calor. A bomba de calor troca calor produzido no evaporador e a energia associada ao trabalho do compressor é adicionada ao escoamento de ar de modo a que este aqueça o ar onde é insuflado. Estes tipos de equipamentos normalmente são utilizados em áreas com défices de água e postos em coberturas para não reduzir a área útil dos edifícios [47].



Figura 3.6 – Equipamento constituinte de um sistema *Rooftop* sobre a sala B001 da FEUP. [Foto do autor]

As características técnicas dos equipamentos *Rooftop* utilizados na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto são apresentadas no quadro 3.2.

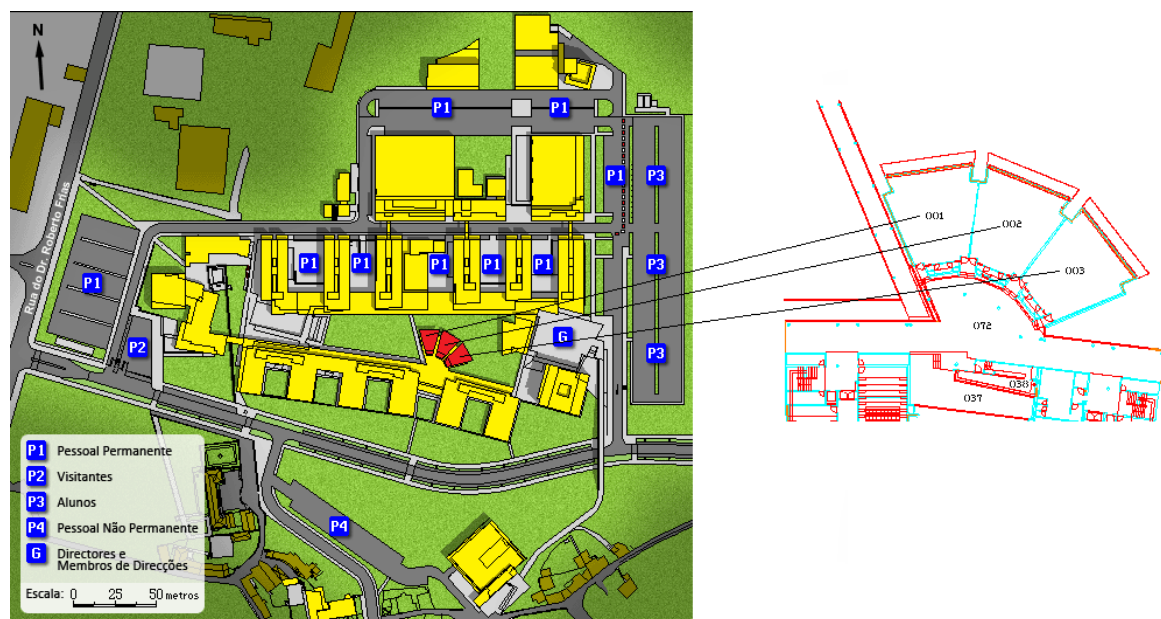


Figura 3.7 – Salas de aula da FEUP com sistema *Rooftop* [48].

Quadro 3.2 – Características dos equipamentos tipo *Rooftop* instalados na FEUP (sobre as salas B001, B002 e B003).

Marca	HCF LENNOX	Tensão reduzida de controlo	24 V
Tipo de unidade	RTK 11 PC	Potência	31,7 kW
Número de série	216 927-01/03	Corrente de arranque	137 Amper
Alimentação elétrica	400 V, trifásico, 50 Hz	Ano	1999
Fluido refrigerante	R22		

3.4.3.2. PROBLEMAS TÍPICOS NOS *ROOFTOP'S* E POSSÍVEIS SOLUÇÕES

Os *Rooftop's* são os sistemas de AVAC que originam os problemas mais caros e frustrantes relacionados com o ruído e vibração. Os mais caros porque para resolver os seus problemas normalmente é necessário recorrer à sua extração das coberturas e os mais frustrantes porque após a sua instalação torna-se muito difícil descobrir a origem do problema. A figura 3.8 demonstra os erros mais graves na instalação destes equipamentos sobre zonas sensíveis ao ruído enquanto a figura 3.9 demonstra a sua correta instalação.

Nestes equipamentos as principais fontes de ruído são: os ventiladores, os compressões, a turbulência do ar dentro os painéis do equipamento e as condutas. Em sistemas de grande porte (≥ 70 kW) em que não haja conformidade das condutas com as orientações fornecidas pela SMACNA (*Sheet Metal and Air Conditioning Contractor's National Association*), o fluxo de ar pode chocar contra as paredes das condutas originando ruídos intensos de baixas frequências. A utilização de apoios anti-vibráteis torna-se neste casos elementos indispensáveis para o controlo do ruído e vibração originários destes equipamentos [46].

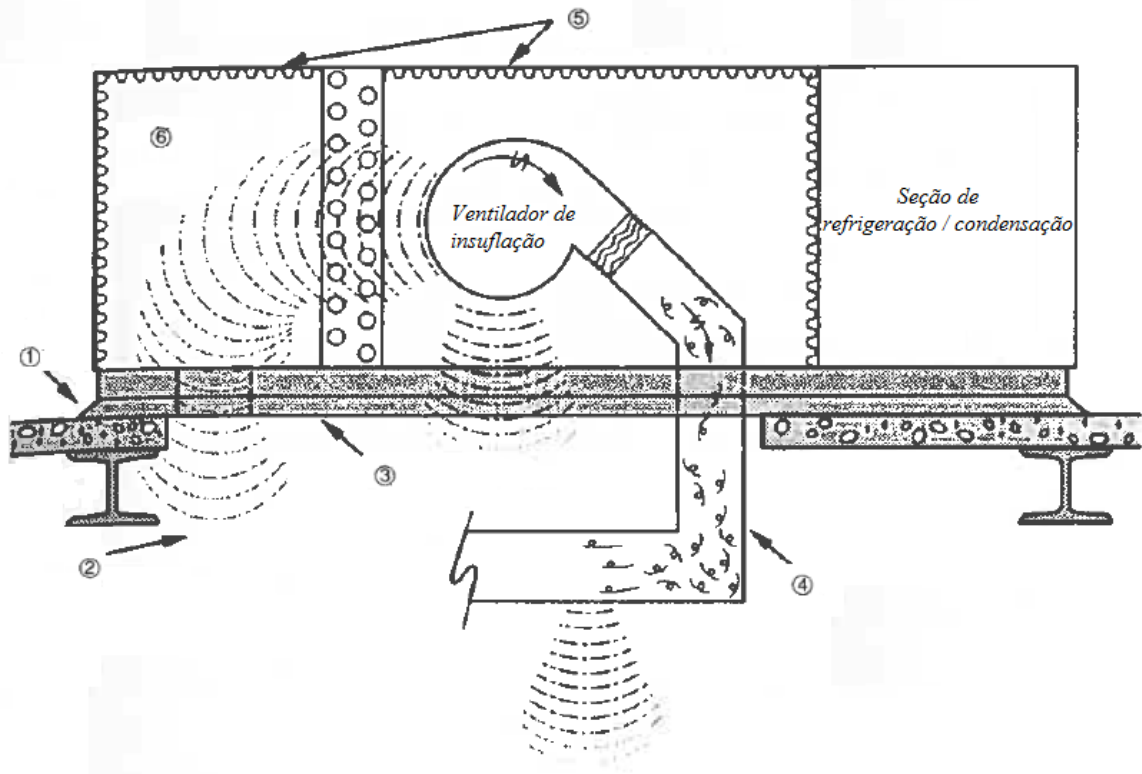


Figura 3.8 – Problemas do sistema *Rooftop* quando montados sobre zonas sensíveis ao ruído [adaptado de 46].

- 1) Inexistência de isolamento vibratório entre o equipamento e a estrutura de suporte;
- 2) Caminho de retorno de ar sem tratamento acústico;
- 3) Estrutura de suporte do equipamento *Rooftop* não se encontra presente ao longo de todo o desenvolvimento do equipamento;
- 4) Cotovelo do duto com um ângulo de 90° provoca turbulência excessiva do ar, perda de carga e vibração;
- 5) Utilização de uma camada fina (< 50 mm) de isolamento sonoro;
- 6) Insuficiência de tratamento acústico em todo o espaço da caixa de retorno de ar. [46]

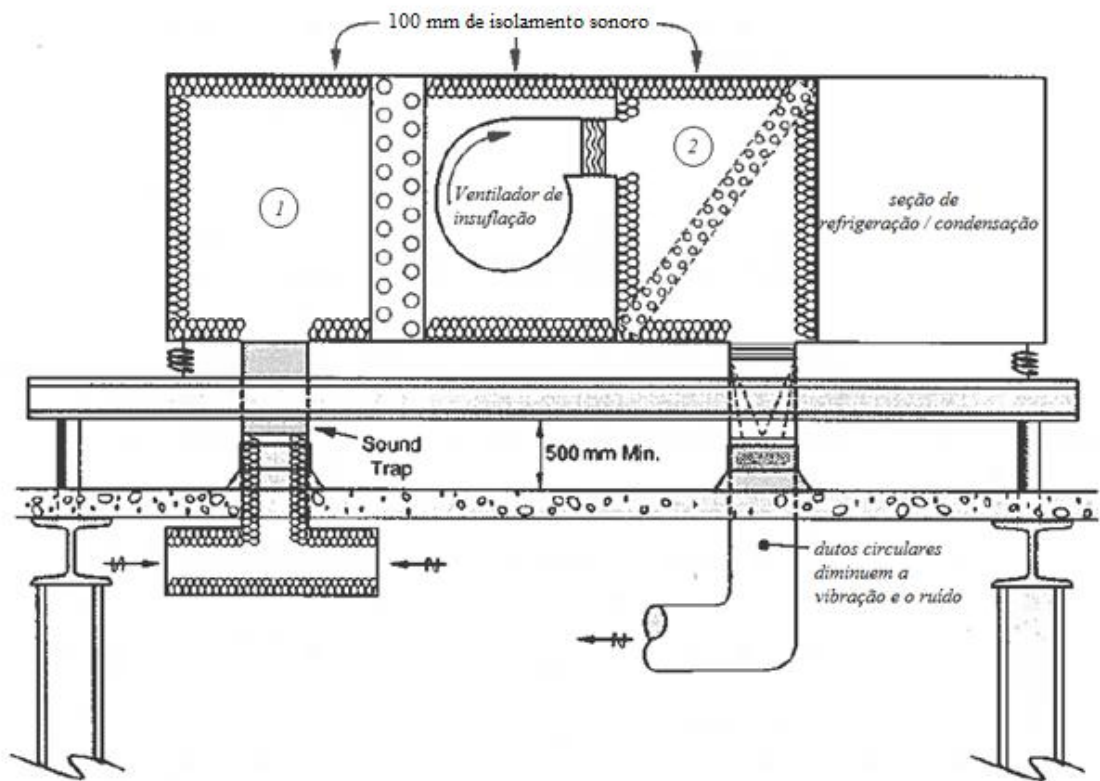


Figura 3.9 – Montagem correta dos *Rooftop's* sobre zonas sensíveis ao ruído [adaptado de 46].

- 1) Tratamento acústico em todo o espaço da caixa de retorno de ar;
- 2) Tratamento acústico em todo o espaço da caixa de saída de ar.

Algumas recomendações a nível de projeto podem são indicas de seguida de forma a diminuir o ruído e a vibração provocadas por este tipo de equipamentos [46]:

- 1) A cobertura que suporta o equipamento deverá apresentar uma estrutura rígida de forma a não se deformar mais de 6 mm na combinação que conduza a cargas máximas no seu tramo;
- 2) O equipamento deverá estar localizado a pelo menos 7,5 m de qualquer área sensível ao ruído;
- 3) Devem ser incorporados apoios anti-vibráteis entre a estrutura e o equipamento;
- 4) As ligações entre os diversos componentes do sistema deverão ser realizadas por elementos flexíveis;
- 5) Se for necessário colocar os equipamentos sobre uma área sensível a construção da cobertura deverá apresentar um bom isolamento sonoro.

3.5. SUBJETIVIDADE DO CONCEITO “CONFORTO”

Os sistemas AVAC foram desenvolvidos com o intuito de proporcionar um maior conforto às pessoas. O termo *conforto* é variável e depende de fatores como a temperatura, humidade, ventilação e fontes

de radiação que atuam sobre os ocupantes. Existem fatores como o odor, poeira, ruído e vibração que podem tornar desconfortáveis os locais alvo de ocupação por parte das pessoas. Um sistema de AVAC bem projetado e implementado, consegue manter estes fatores dentro de certos limites.

Considera-se que um indivíduo se encontra em condições de conforto termo-higrométrico quando não experimenta qualquer perturbação na realização das suas atividades. Como tal o sistema termo-regulador do organismo deve-se encontrar em equilíbrio com um determinado ambiente de forma a criar estabilidade entre as suas funções bio-fisiológicas [49].

O corpo humano produz maior ou menor quantidade de energia consoante a idade, tamanho e género sexual do indivíduo em questão. O corpo humano tem um sistema de regulação de temperatura que, independentemente das condições ambientais, está situado por volta dos 36,9 °C [44]. A energia necessária para manter o corpo a esta temperatura será menor para situações amenas e mais elevada para condições adversas. O padrão de conforto relativo à temperatura é definido em condições de modo a que 80% ou mais dos ocupantes se sintam bem nas condições ambientais interiores.

O termo conforto é portanto um elemento subjetivo. Depende portanto das pessoas sob análise, bem como das atividades que estejam a desempenhar e das roupas que estas estejam a vestir.

A temperatura do corpo humano é controlada pelo equilíbrio térmico que depende do metabolismo, circulação do sangue, respiração e do calor libertado pela pele. O metabolismo determina a quantidade de energia que é convertida através de transformações químicas no interior do corpo para energia térmica e a circulação sanguínea controla a quantidade de energia que é transportada para a superfície da pele. O metabolismo deverá regular a energia calorífica de modo a que a quantidade de energia produzida seja dissipada na mesma proporção, de forma a não provocar um funcionamento anormal, designando-se este equilíbrio por “estado de neutralidade térmica”.

Na respiração o ar inspirado entra no sistema respiratória à temperatura ambiente e quando é expirado sai próximo da temperatura corporal e normalmente com mais humidade. O calor pode ser libertado da pele por processos de convecção, condução e radiação [43].

O calor gerado pelo metabolismo de cada pessoa é variável com a atividade que esta desempenha e pode expressar-se pela unidade *met* (W/m²). A título de exemplificativo pode-se referir que 1 *met* corresponde a uma pessoa sedentária, 0,8 *met* corresponde a uma pessoa em repouso e 8 *met* corresponde a uma pessoa a fazer desporto (Figura 3.10).

De modo a atingir o “estado de neutralidade térmica” o organismo reage automaticamente às condições ambientais. Caso esteja presente a condições de temperaturas baixas, o organismo reduz a temperatura superficial por vaso-contracção e aumenta a produção interna de energia, ou caso esteja presente a condições de temperaturas elevadas o organismo aumenta a sua temperatura superficial através da vasodilatação e dissipa calor por transpiração [49].

O outro fator pessoal que afeta o conforto é o tipo e quantidade de roupa que a pessoa veste e pode expressar-se pela unidade *clo* (m².°C/W) (Figura 3.11).

As exigências dos edifícios deverão ser tais de modo a que os seus utentes com vestuário adequado à época possam realizar as suas atividades sem sensação de desconforto causada por trocas de calor exageradas com o ambiente ou então por desigualdade exagerada de temperatura entre diversas partes do corpo [49].

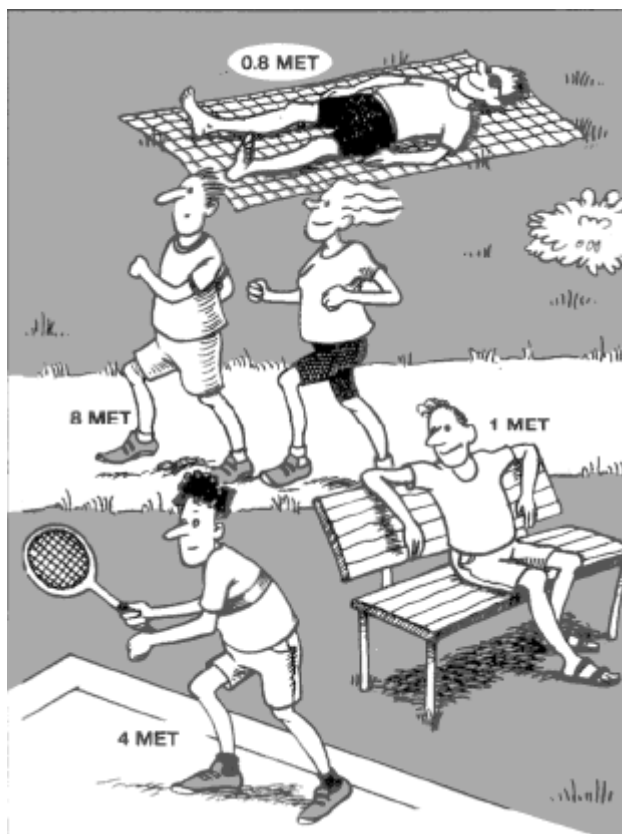


Figura 3.10 – Variação do *met* com a atividade física [50].

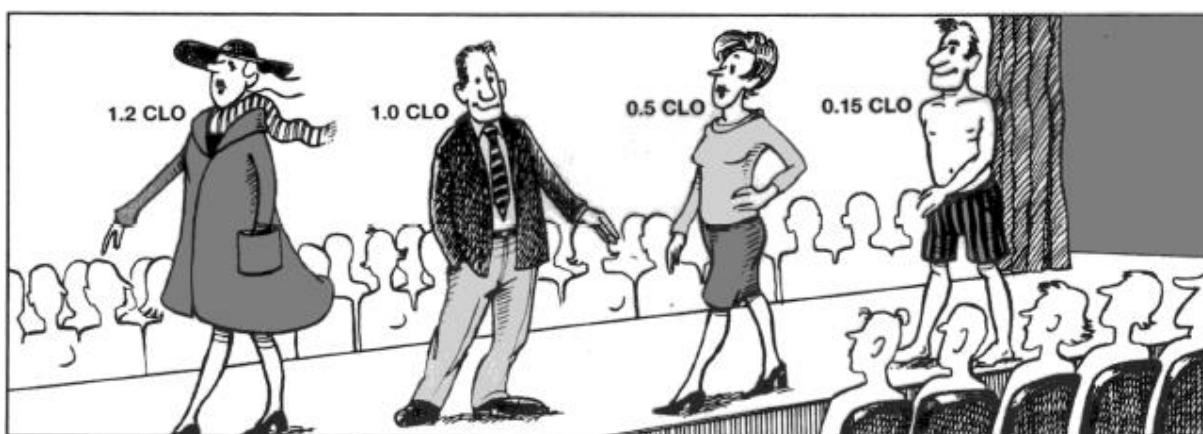


Figura 3.11 – Variação do *clo* com a quantidade de roupa vestida [50].

A relação existente entre a atividade realizada por uma pessoa e a roupa que esta utiliza pode ser obtida em função da temperatura operativa. A norma EN ISO 7730 [51] traduz a relação anteriormente referida através da figura 3.12. A temperatura operativa é definida como a temperatura constante dentro de um compartimento, no qual o ocupante troca as mesmas quantidades de calor por radiação e convecção com o ambiente onde está inserido [52].

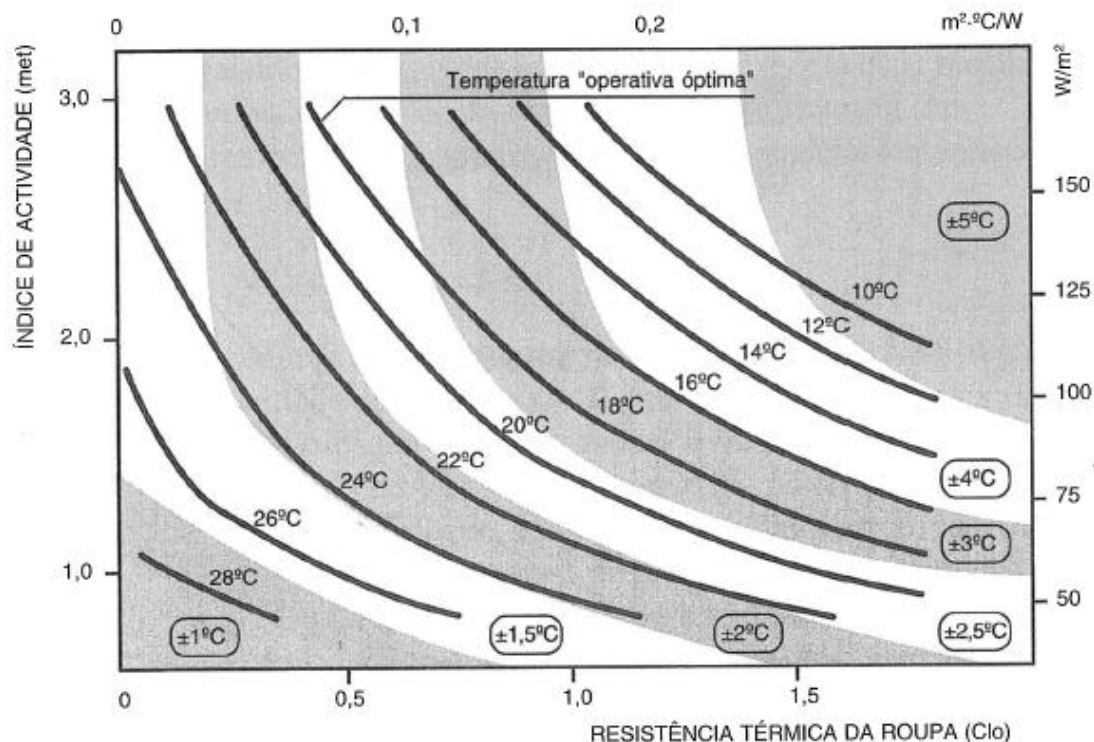


Figura 3.12 – Relação entre a temperatura operativa ótica, tipo de roupa e tipo de atividade [49].

A norma EN ISO 7730 [51] apresenta uma série de recomendações relativas às condições interiores dos edifícios. De seguida encontram-se transcritas as recomendações feitas pela norma para atividade sedentária resumidas no livro “Climatização em Edifícios” [49].

i) *Em condições de Inverno:*

- Temperatura operativa: compreendida entre 20 e 24 °C;
- Diferença de temperatura do ar na vertical entre 0,1 e 1,8 m acima do pavimento (níveis do tornozelo e da cabeça) menor que 3 °C;
- Temperatura superficial do pavimento compreendida entre 19 e 26 °C;
- Velocidade média do ar menor que 0,15 m/s;
- Assimetria da temperatura radiante devida a janelas ou outras superfícies frias verticais menor que 10 °C (em relação a um pequeno plano vertical colocado a 0,6 m acima do pavimento);
- Assimetria da temperatura radiante devida a painéis radiantes de teto menor que 5 °C (em relação a um pequeno plano horizontal colocado a 0,6 m acima do pavimento).

ii) *Em condições de Verão*

- Temperatura operativa compreendida entre 23 e 26 °C;
- Diferença de temperatura do ar na vertical, entre 0,1 e 1,8 m acima do pavimento, inferior a 3 °C;
- Velocidade média do ar inferior a 0,25 m/s.

4

LEGISLAÇÃO APLICÁVEL

4.1. PORTUGAL

O ruído, como estímulo sonoro sem conteúdo informativo para o auditor, é responsável pela degradação da qualidade de vida das populações. O ruído pode perturbar a população de forma física ou psicológica consoante a sua composição em frequência e intensidade. As reações do ser humano quando sujeito a perturbações do estímulo sonoro podem ser diversas como: stress, alterações no humor, falta de concentração, hipertensão arterial, insónias e irritabilidade. Não é necessário que o ruído apresente grande intensidade para estes problemas começarem a surgir.

A exposição excessiva a um ruído intenso pode originar perda de audição, a qual só se começa a notar quando interfere com o domínio da palavra. A classificação da surdez pode ser realizada em relação à perda auditiva apresentada pelo ouvinte, em [53]:

- Surdez Leve – entre 20 e 40 dB;
- Surdez Moderada – entre 40 e 70 dB;
- Surdez Severa – entre 70 e 90 dB;
- Surdez Profunda – superior a 70 dB.

No entanto o ruído não é o único agente causador de surdez. Existem outros agentes que coagindo ou não com o ruído, como o caso de exposição a certos produtos químicos, vibrações e uso de alguns medicamentos, contribuem para este fenómeno [54].

A necessidade de legislação sobre o ruído nasce da necessidade de salvaguarda da saúde e do bem-estar do ser humano, e vem sofrendo constantes atualizações consoante os estudos realizados e tecnologias desenvolvidas.

A atual legislação Portuguesa em vigor para avaliar o ruído produzido no interior dos edifícios encontra-se expressa no Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), instituído inicialmente pelo Decreto-Lei nº 129/2002 de 1 de Maio [55] e substituído pelo Decreto-Lei nº 96/2008, de 9 de Junho [56].

A alteração do Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) surgiu como forma de atualizar, quer os parâmetros de desempenho acústico dos edifícios, indicadores do ruído de equipamentos e instalações à luz da normalização, e legislação europeia quer as crescentes necessidades de satisfação por parte das populações [42, 57].

A responsabilidade na elaboração de projetos de condicionamento acústico está entregue aos técnicos qualificados, que podem ser engenheiros desde que possuam especialização em engenharia acústica outorgada pela ordem dos Engenheiros ou então técnicos que tenham recebido qualificação adequada na área da acústica de edifícios pelas respetivas ordens ou associações profissionais [56].

O RRAE é aplicável aos seguintes tipos de edifícios [56]:

- Edifícios habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras;
- Edifícios comerciais e de serviços, e parte similares em edifícios industriais;
- Edifícios escolares e similares, e de investigação;
- Edifícios hospitalares e similares;
- Recintos desportivos;
- Estações de transporte de passageiros;
- Auditórios e salas.

O presente trabalho tem como objetivo estudar o ruído produzido por equipamentos de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC) num caso específico: interior das salas de aula da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (edifício do tipo escolar). O RRAE estabelece neste tipo de edifícios valores máximos para o ruído produzido por equipamentos conforme descrito no artigo 7º. O valor do ruído padronizado produzido por este tipo de equipamentos é obtido experimentalmente através do parâmetro $L_{Ar,nT}$ (Equação 4.1).

$$L_{Ar,nT} = L_A + K_{tonal} - 10 \times \log \frac{T}{T_0} \text{ dB} \quad (4.1)$$

Onde,

$L_{Ar,nT}$ – Nível de ruído padronizado (dB);

L_A – Nível sonoro contínuo equivalente do equipamento, medido durante um intervalo de tempo especificado (dB);

K_{tonal} - Constante devido às características tonais do ruído que penaliza com 3 dB(A) caso uma banda de frequência de 1/3 de oitava dos valores de L_A sobressaia em 5 dB ou mais em relação às duas bandas adjacentes, na gama dos 50 aos 80k Hz;

T - Tempo de reverberação medido *in situ* (s);

T_0 – Tempo de reverberação de referência, $T_0 = 0,5$ s.

Os valores regulamentares para este tipo de edifícios encontram-se expressos no Decreto-Lei nº 96/2008 de 9 de Junho (RRAE) no artigo 7º que se encontra parcialmente transcrito de seguida [56]:

1 — Os edifícios escolares e similares, de investigação e de leitura estão sujeitos aos seguintes requisitos acústicos:

(...)

d) No interior dos locais que constam do quadro III do anexo ao presente Regulamento, considerados mobilados normalmente e sem ocupação, o tempo de reverberação, T , correspondente à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, deve satisfazer as condições indicadas no referido quadro;

(...)

f) No interior dos locais de receção indicados no quadro II, o nível de avaliação, $L_{Ar,nT}$, do ruído particular de equipamentos do edifício deve satisfazer as condições indicadas no quadro IV do anexo ao presente Regulamento.

2 — A determinação do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{2m, nT, w}$ ou $D_{nT, w}$, do índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nT, w}$, do tempo de reverberação, T , e do nível de avaliação, $L_{Ar, nT}$, deve ser efetuada em conformidade com o disposto na normalização portuguesa aplicável ou, caso não exista, na normalização europeia ou internacional.

3 — Na determinação das componentes tonais do nível de avaliação, $L_{Ar, nT}$, é adotada a metodologia definida no anexo I ao Regulamento Geral do Ruído.

4 — Nas avaliações in situ destinadas a verificar o cumprimento dos requisitos acústicos dos edifícios deve ser tido em conta um fator de incerteza, I , associado à determinação das grandezas em causa.

5 — O edifício, ou qualquer das suas partes, é considerado conforme aos requisitos acústicos aplicáveis, quando, cumulativamente:

(...)

c) O valor obtido para o nível de avaliação, $L_{Ar, nT}$, diminuído do fator I no valor de 3 dB(A), satisfaça o limite regulamentar;

d) O valor obtido para o tempo de reverberação, T , diminuído do fator I no valor de 25% do limite regulamentar, satisfaça o limite regulamentar.

Os valores máximos do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1k, 2k Hz e os valores máximos do nível de ruído padronizado de equipamentos para edifícios escolares são apresentados no quadro 4.1 e 4.2, respetivamente.

Quadro 4.1 – Valores máximos do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1k, 2k Hz para edifícios escolares em função do volume, V (m^3) [adaptado de 3, 56].

Locais	Tempo de reverberação médio (500/1k/2k Hz) (s)	
	Sem sistema de difusão de mensagens sonoras	Com sistema de difusão de mensagens sonoras
Salas de aulas, bibliotecas, salas polivalentes, refeitórios	$0,15 \times V^{1/3}$	
Ginásios	$0,15 \times V^{1/3}$	$0,12 \times V^{1/3}$

Quadro 4.2 – Valores máximos do nível de ruído padronizado de equipamentos para edifícios escolares [adaptado de 3, 56].

Locais	Nível de avaliação padronizado, $L_{Ar, nT}$ (dB)	
	Funcionamento do equipamento de forma contínua	Funcionamento do equipamento de forma intermitente
Biblioteca	30	35
Salas de aula, de aula musical, de professores, administrativas, polivalentes, refeitórios, ginásios, oficinas, berçários e corredores de grande circulação	35	40

4.2. OUTROS PAÍSES

4.2.1. ALEMANHA

Na Alemanha a norma DIN 18041 [58, 59], revista em 2004, intitulada de “qualidade acústica em salas pequenas e de médio porte” recomenda valores do tempo de reverberação nas frequências de 500 e 1000 Hz em função do tipo de compartimento e das funções a que este se destina (Quadro 4.3).

O tempo de reverberação é obtido através das expressões do quadro 4.3, para compartimentos mobilados e ocupados. Quando a sua medição for realizada para locais desocupados, a norma refere que o tempo de reverberação não deverá ultrapassar em 0,2 s o valor obtido para o mesmo local ocupado [58, 60, 61].

Quadro 4.3 – Valores máximos do tempo de reverberação médio nas frequências de 500 e 1k Hz em diferentes locais mobilados e ocupados segundo a norma DIN 18041 [adaptado de 58].

Locais	Tempo de reverberação médio (500/1k Hz) (s)
Salas de aula, auditórios, creches	$0,32 \times \log(V) + 0,17$
Salas de música	$0,45 \times \log(V) + 0,07$
Tribunais, áreas de reunião, piscinas	$0,37 \times \log(V) + 0,14$

A norma DIN 4109 [62, 63], intitulada de “proteção acústica em edificação” estabelece os valores máximos do nível sonoro do ruído de fundo em função do local conforme apresentado no quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Valores máximos do ruído de fundo provocado pelos equipamentos AVAC pela norma alemã DIN 4109 [adaptado de 62].

Local	L_{Aeq} (dB)
Salas de aula	35 – 40
Bibliotecas	30 – 35

4.2.2. BRASIL

No Brasil a norma NBR 6401 [64] estabelece valores máximos e de conforto para o nível sonoro do ruído de fundo provocado pelos equipamentos de ar-condicionado em função do local, conforme apresentado no quadro 4.5. A norma estabelece as condições mínimas exigíveis para que se possam obter resultados razoáveis em instalações deste género [64].

A norma refere ainda que nos casos especiais, em que esta não seja integralmente obedecida, deve constar, no projeto elaborado a justificativa relativa a todos os pontos que dela divergirem. O tempo de medição do ruído de fundo é variável com a experiência do investigador em questão visto não haver restrições sobre o mesmo [64].

Quadro 4.5 – Valores de conforto e máximos do nível sonoro do ruído de fundo provocado pelos equipamentos de ar-condicionado em diferentes locais segundo a norma NBR 6401 [adaptado de 64].

Local	L_{Aeq} máximo de Conforto (dB)	L_{Aeq} máximo Limite (dB)
Bibliotecas	35	45
Salas de aula	35	45
Salas de concerto	30	40
Salas de projeto e administração	35	45

O Brasil não possui nenhuma norma referente ao tempo de reverberação para salas de aula. A única norma que possui relativa ao tempo de reverberação é a NBR 12179 - Tratamento Acústico em Recintos Fechados [65], a qual define o tempo de reverberação ótimo na frequência de 500 Hz em função do volume e do local (figura 4.1).

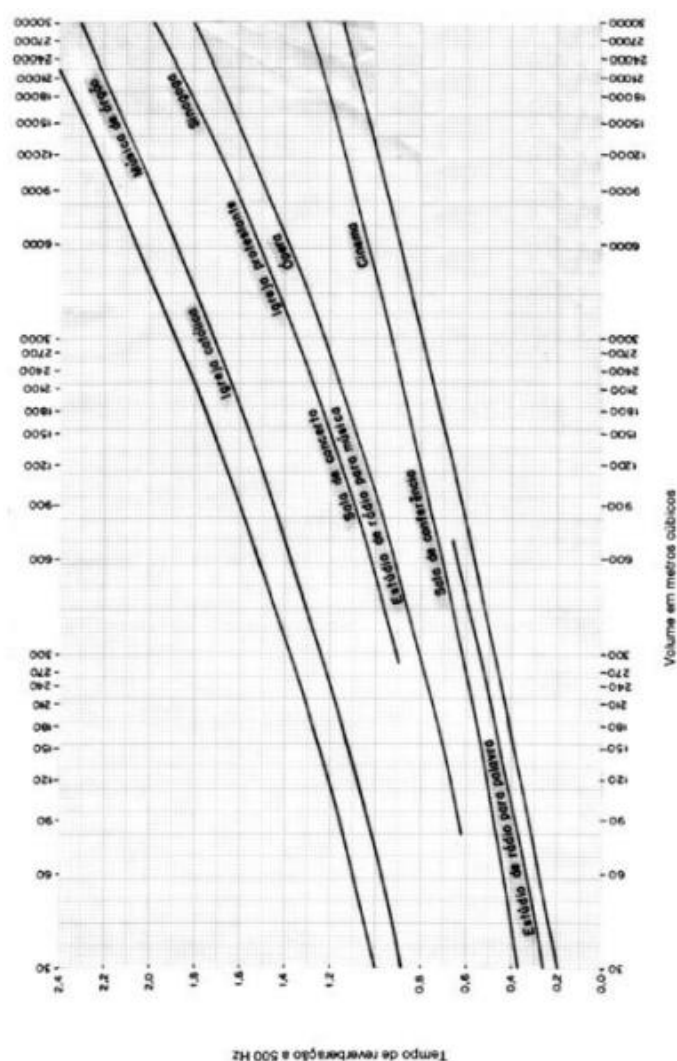


Figura 4.1 – Valores do tempo de reverberação ótimo na frequência de 500 Hz em função do volume e tipo de compartimento conforme a Norma NBR 12179 [65].

4.2.3. ESPANHA

Em Espanha o decreto-lei de 1371/2007 de 19 de Outubro [66] aprova o documento DB-HR, que tem por objetivos a melhoria da qualidade dos edifícios bem como a promoção da inovação e a sustentabilidade. Trata-se de um documento que regula os requisitos acústicos de modo a satisfazer a segurança e o bem-estar.

Este documento impõe limitações ao tempo de reverberação para salas de aula e de conferências com volumes não superiores a 350 m³ e para cantinas e restaurantes, qualquer que seja o tipo de edifício, independentemente do volume.

O quadro 4.6 apresenta os valores limites do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1k, 2k Hz em função dos locais.

No quadro 4.7 são apresentados os valores limites do nível sonoro do ruído de fundo provados pelos equipamentos AVAC segundo o documento DB-HR. Estes valores variam consoante a utilização dos edifícios e o tipo de local.

Quadro 4.6 – Valores máximos do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1k, 2k Hz em diferentes locais segundo o DB-HR [adaptado de 67].

Local	Tempo de reverberação médio (500/1k/2k Hz) (s) ≤
Salas de aulas e de conferências vazias	0,7
Salas de aulas e de conferências mas com assentos fixos	0,5
Cantinas e Restaurantes	0,9

Quadro 4.7 – Valores máximos do nível sonoro do ruído de fundo provocado pelos equipamentos AVAC segundo DB-HR [adaptado de 67].

Tipo de Edifício	Local	L _{Aeq} (dB)
Escolar	Salas de Aula	40
	Bibliotecas	35

4.2.4. ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA

Nos Estados Unidos da América em 2010 foi feita uma revisão à norma ANSI/ASA S12.60 [68] publicada em 2002, que contém valores limites para o ruído de fundo aplicáveis a salas de aula e outros espaços de aprendizagem constituintes da escola. A norma refere que as salas de aula e os espaços de aprendizagem não devem apresentar volumes superiores a 566 m³, sob pena de serem considerados “espaços de educação auxiliares” sem qualquer limitação em termos de volume. É aplicável ao ruído provocado pelos equipamentos de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC), desde que a medição seja realizada com o espaço desocupado e sem a interferência de ruído provocado pela presença humana ou eletrónica dos elementos necessários ao decorrer de uma aula, tais como computadores, retroprojetores ou movimentos de cadeiras.

A norma ANSI/ASA S12.60 destina-se a fornecer um conjunto mínimo de requerimentos baseados nos melhores conhecimentos científicos, para serem utilizados em projetos com o objetivo de fornecer boas características acústicas às salas de aula no qual a comunicação através da voz é a principal fator no processo de aprendizagem [68].

Esta norma fixa valores máximos para o nível sonoro do ruído de fundo, num período de uma hora, provocado pelos equipamentos AVAC (Quadro 4.8) e valores máximos para o tempo de reverberação nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz em função do tipo de espaço (Quadro 4.9).

Quadro 4.8 – Valores máximos do nível sonoro do ruído de fundo provocado pelos equipamentos AVAC pela norma ANSI/ASA S12.60 [adaptado de 68].

Espaços de aprendizagem	Condição de funcionamento do sistema AVAC	L _{Aeq} (dB)	
		Equipamentos simples ^{a)} de AVAC	Equipamento múltiplo ^{b)} de AVAC
Principais	Na máxima capacidade	35	37
	Na mínima capacidade	Não aplicável	34
Auxiliares	Na máxima capacidade	40	42
	Na mínima capacidade	Não aplicável	39

a) Sistema de operação simples.

b) Sistema de operação múltiplo, aquecimento ou arrefecimento, várias velocidades de funcionamento da ventilação.

Quadro 4.9 – Valores máximos do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1k, 2k Hz em diferentes locais segundo a norma ANSI/ASA S12.60 [adaptado de 68].

Local	Tempo de reverberação médio (500/1k/2k Hz) (s) ≤
Espaços de aprendizagem principal (Volume ≤ 283 m ³)	0,6
Espaços de aprendizagem principal (283 m ³ < Volume ≤ 566 m ³)	0,7
Espaços de aprendizagem principal (Volume > 566 m ³)	Sem requerimento

4.2.5. FRANÇA

Em França até 1992 os requisitos acústicos existentes restringiam a sua aplicação a edifícios do tipo habitacional, o que mudou com a entrada em vigor do Decreto-Lei n.º 92-1444 [69] que define requisitos acústicos para edifícios educacionais.

O limite máximo do nível sonoro do ruído de fundo presente num local é variável consoante a utilização do equipamento seja feita de forma contínua ou intermitente (Quadro 4.10).

O tempo de reverberação é calculado como sendo a média aritmética, para salas de aula mobiladas e desocupadas, nas frequências de 500, 1k e 2k Hz. Os valores máximos são apresentados no quadro 4.11.

Quadro 4.10 – Valores máximos do nível sonoro do ruído de fundo provocado pelos equipamentos AVAC em diferentes locais segundo o Decreto – Lei nº 92 – 1444, França [adaptado de 69].

Locais	L _{Aeq} (dB)	
	Funcionamento do equipamento de forma contínua	Funcionamento do equipamento de forma intermitente
Biblioteca, salas de aula	33	38
Átrios, Corredores, Cantina, enfermaria	38	43

Quadro 4.11 – Valores máximos do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1k, 2k Hz em diferentes locais segundo o Decreto-Lei nº 92-1444, França [adaptado de 69].

Local	Tempo de reverberação médio (500/1k/2k Hz) (s) (s)
Creches, salas de aula, salas de música (Volume ≤ 250 m ³)	0,4 ≤ TR ≤ 0,8
Bibliotecas, salas de aula, salas de música, escritórios (Volume > 250 m ³)	0,6 ≤ TR ≤ 1,2

4.2.6. REINO UNIDO

No Reino Unido o documento *Building Bulletin 93 – Acoustic Design of Schools* (BB93) publicado em 2003 [70] contém recomendações quanto aos requisitos acústicos que as salas de aulas devem apresentar.

Os objetivos deste documento são assegurar que a conceção e a construção do edifício proporcione condições acústicas apropriadas para a comunicação clara entre professor e alunos e que o ruído de fundo não interfira com as atividades de estudo. São especificados valores limites de parâmetros acústicos como o ruído de fundo, isolamento sonoro a ruídos de percussão e condução área e o tempo de reverberação. Este documento refere ainda valores ideais para o STI para *open spaces*.

No quadro 4.12 são apresentados os valores limites do nível sonoro do ruído de fundo para alguns locais. Os valores apresentados dizem respeito a uma medição de 30 minutos em cada local, ou seja, L_{Aeq, 30 min} e não contabilizam ruídos dos equipamentos utilizados para o ensino.

Este documento especifica ainda o tempo de reverberação máximo nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz em função do tipo de local conforme se apresenta no quadro 4.13.

Quadro 4.12 – Valores máximos do nível sonoro do ruído de fundo em diferentes locais segundo o BB93 [adaptado de 70].

Local	Ruído do local emissor	Tolerância ao ruído do local recetor	$L_{Aeq, 30 \text{ min}}$ (dB) \leq
Escolas primárias - salas de aula	Médio	médio	35
Escolas secundárias – salas de aula	Médio	médio	35
Auditório – pequeno (< 50 pessoas)	Médio	baixo	35
Auditório – grande (> 50 pessoas)	Médio	muito baixo	30
Salas administrativas e de professores	Médio	médio	40
Sala de música principal	Alto	médio	35
Sala de música secundária	muito alto	médio	35
Laboratórios de ciências	Médio	médio	40
Biblioteca	Baixo	baixo	35
Piscina	Alto	Alto	50
Ginásio	Alto	médio	40

Quadro 4.13 – Valores máximos do tempo de reverberação médio nas frequências de 500,1k e 2k Hz em diferentes locais segundo o BB93 [adaptado de 70].

Local	Tempo de reverberação médio (500/1k/2k Hz) (s)
Escolas primárias - salas de aula	0,6
Escolas secundárias – salas de aula	0,8
Auditório – pequeno (< 50 pessoas)	0,8
Auditório – grande (> 50 pessoas)	1,0
Salas administrativas e de professores	1,0
Sala de música principal	1,0
Sala de música secundária	1,0
Laboratório de ciências	0,8
Biblioteca	1,0
Piscina	2,0
Ginásio	1,5

4.3. COMPARAÇÃO ENTRE PAÍSES

A regulamentação existente sobre os requisitos acústicos nas salas de aula é variável consoante o país de análise. No quadro 4.14 apresenta-se de forma resumida para sete países, os valores regulamentares ou recomendados para o nível sonoro contínuo equivalente e para os tempos de reverberação para duas situações de volume das salas de aula (150 e 350m³).

Quadro 4.14 – Valores máximos normativos e regulamentares do nível sonoro contínuo equivalente (L_{Aeq}) e do tempo de reverberação médio em função do volume para sete países.

País	Tipo de documento	L_{Aeq} (dB) ≤	Frequências do tempo de reverberação (Hz)	Tempo de Reverberação médio (s) (V=150 m ³)	Tempo de Reverberação médio (s) (V=350 m ³)
Alemanha	Norma	35	500/1k	≤ 0,9	≤ 1,0
Brasil	Norma	45	500	≤ 0,55*	≤ 0,65*
Espanha	Legislação	40	500/1k/2k	≤ 0,7	≤ 0,7
Estados Unidos da América	Norma	35	500/1k/2k	≤ 0,6	≤ 0,7
França	Legislação	33	500/1k/2k	0,4 ≤ Tr ≤ 0,8	0,6 ≤ Tr ≤ 1,2
Portugal	Legislação	35	500/1k/2k	≤ 0,8	≤ 1,1
Reino Unido	Norma	35	500/1k/2k	≤ 0,8	≤ 0,8

* Valor para salas de conferência, pois a NBR 12179 não apresenta valores para salas de aula.

Analisando o quadro 4.14, verifica-se que o valor máximo do nível sonoro do ruído de fundo passível de ser atingido nas salas de aula apresenta o valor mais exigente em França (33 dB(A)). No extremo oposto encontra-se o Brasil com um valor máximo de 45 dB(A). No entanto, a norma NBR 6401 menciona um valor de conforto, de 35 dB(A), idêntico aos máximos regulamentares de países como Portugal, Reino Unido, Estados Unidos da América e Alemanha.

Analisando a situação de Portugal é possível verificar que este apresenta um valor do nível sonoro do ruído de fundo máximo de 35 dB(A). Este valor é bastante aceitável comparativamente aos restantes países aqui descritos. Sendo que em relação à França apresenta uma diferença de 2 dB(A), situando-se no mesmo nível de países como os Estados Unidos da América e Reino Unido.

Relativamente ao tempo de reverberação a análise foi feita para duas situações de volumes diferentes, vistos que países como Portugal, Brasil e Estados Unidos da América, França e Alemanha elaborarem documentos em que o tempo de reverberação depende do volume das salas. Os volumes adotados para as salas de aula foram de 150 m³ e 350 m³. Para o Brasil visto não haver legislação regulamentar utilizou-se a Norma NBR 12179 que define o tempo de reverberação ótimo em função do volume para uma frequência de 500 Hz e considerou-se as salas de aula como sendo salas de conferência, visto este documento não apresentar valores do tempo de reverberação para salas de aula.

Através do quadro 4.14 pode constatar-se que o parâmetro relativo ao tempo de reverberação apresenta diferentes frequências de análise, consoante o país. A Alemanha restringe a sua análise às

frequências de 500 e 1k Hz, o Brasil apenas se limita de 500 Hz e os restantes países confinam-se as frequências de 500, 1k e 2k Hz.

Comparando os países relativos às frequências de 500, 1k e 2k Hz é possível verificar que Portugal apresenta um valor máximo de 1,1 s para o volume de 350 m³ o qual se distancia de 0,3 s da Espanha e EUA e de 0,4 s do Reino Unido. No entanto quando comparado com a França, Portugal consegue apresentar um valor inferior em 0,1 s do máximo permitido por aquele país.

Para o volume de 150 m³ confere-se que Portugal apresenta um valor máximo de 0,8 s igualando o valor limite do Reino Unido e distanciando-se da Espanha e dos EUA de 0,1 e 0,2 s, respetivamente. A França apresenta um valor máximo de 0,8 s, o que faz com que Portugal mais uma vez apresente um valor melhor que este país.

Como comentário final importa realçar o fato do tempo de reverberação ótimo de um local depender do tipo de atividade que nele se desenrola e não do volume. Seria assim de enorme importância que Portugal revisse a sua forma de cálculo do tempo de reverberação máximo de forma a privilegiar os utentes dos edifícios em função do cumprimento legislativo.

5

CASO DE ESTUDO

5.1. CARACTERIZAÇÃO DA FEUP

5.1.1. A FEUP ONTEM

O início longínquo da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto remonta ao ano de 1765 aquando foi decretada a origem do ensino na Escola de Náutica, com o objetivo de formar pilotos e marinheiros indispensáveis à navegação comercial [71].

A 9 de Fevereiro de 1803, um Alvará Régio cria a Academia Real da Marinha e Comércio da Cidade do Porto em substituição da Escola de Náutica devido à necessidade natural da evolução do conhecimento e à sua especialização, dando origem a *“Doutrinas Matemáticas e Navegação, uma aula de Comércio, uma aula de Desenho, e duas aulas de Língua Inglesa e Francesa”* [72].

A Academia Real da Marinha e Comércio da Cidade do Porto sofreu remodelações profundas, dando origem à Academia Politécnica do Porto em 1837 que tinha como objetivo dotar as pessoas com conhecimentos superiores.

A Academia Politécnica do Porto estava instalada nesta altura na “Casa dos Meninos Órfãos da Cidade do Porto” (Figura 5.1), a atual Reitoria, que sofreu remodelações durante o século XIX.



Figura 5.1 - Casa dos Meninos Órfãos da Cidade do Porto [73].

Esta foi a primeira Escola Superior em Portugal a formar engenheiros civis. Durou cerca de 74 anos vindo a ser substituída pela Universidade do Porto com a criação da Faculdade de Ciências e a Faculdade de Medicina no ano de 1911. Nesta altura o ensino da Engenharia processava-se de forma anexa à Faculdade de Ciências.

Em 1915 foi criada a Faculdade Técnica devido às necessidades tecnológicas e experimentais da Engenharia e em 1926 formalizou-se uma reorganização nos estudos e a mudança da designação de Faculdade Técnica para a atual Faculdade de Engenharia.

Todas as novas instituições que derivaram da antiga Academia Politécnica do Porto até à atual Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), estiveram instaladas na “Casa dos Meninos Órfãos da Cidade do Porto” até 1937. Nesse ano a FEUP muda-se para o edifício da Rua dos Bragas (Figura 5.2), a qual formou gerações de engenheiros durante 63 anos até 2000 [72,74].

Estas novas instalações acolhiam apenas os três últimos anos do curso de engenharia que na data tinha uma duração de seis anos, enquanto os três primeiros anos eram lecionados na Faculdade de Ciências.

Em 1971 a duração dos cursos de engenharia foi diminuída em um ano, passando a sua duração a ser de cinco anos e a determinação do plano de estudos feita de forma autónoma pelas escolas. Em 1974, as instalações do edifício da Rua do Bragas passaram a acolher a lecionação do plano de estudos completo para cursos de engenharia.

Os anos que se seguiram foram de grande desenvolvimento em termos de novas políticas que incentivavam as pessoas a prolongar a sua vida académica até ao ensino superior. O que juntamente com desenvolvimento de atividades de investigação, a carência de novos equipamentos e instalações para satisfazer as necessidades dos critérios de qualidade internacionais levou a Faculdade de Engenharia a mudar de instalações para a atuais no polo da Asprela (Figura 5.3). Esta transição ocorre em 2000, sendo que o ano letivo de 2000/01 decorre integralmente nestas novas instalações [72].



Figura 5.2- Instalações da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto de 1937 a 2000 [75].

5.1.2. A FEUP HOJE

Atualmente a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) (Figura 5.3) disfruta de um *campus* com cerca de 100.000 m² de área construída encontrando-se entre as melhores a nível internacional, muito devido as condições que oferece em termos de investigação [72].



Figura 5.3 – Instalações da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto de 2000 até à atualidade [76].

As instalações da FEUP são constituídas por corpos que se desenvolvem ao longo de dois eixos convergentes a ponte, estando as suas dimensões limitadas pelo Átrio Principal e pela Biblioteca. As duas direções adotadas para a descrição das instalações situam-se entre a linha do vale que atravessa a zona e a perpendicular à auto-estrada (A3).

O ponto de convergência dos dois eixos encontra-se localizado no corpo que é constituído pelo Auditório principal que está implantado no enfiamento da Rua do Dr. Plácido da Costa. A Biblioteca por sua vez encontra-se localizada na extremidade oposta, junto à praça de chegada do lado nascente [77].

O corpo no qual se processa o ensino situa-se no lado sul, sendo constituído por um longo corredor central. Este corredor estabelece o acesso às salas de aula presentes ao longo de quatro pisos. No rés-do-chão situam-se as salas de aula com maior volumetria e consequentemente maior capacidade. É neste piso que se processa grande parte do leccionamento das aulas teóricas. Nos pisos superiores estão situados as salas de aula práticas, salas de computadores e salas de estudo;

A numeração das salas de aula está realizada de forma a que o primeiro número corresponda ao piso em que estão situadas e os dois restante ao número da sala.

5.2. AMOSTRA EM ESTUDO

O presente estudo caracteriza acusticamente as diferentes salas de aula recorrendo à medição de parâmetros acústicos em cada tipo de sala, tendo por base as suas dimensões geométricas.

No quadro 5.1 são apresentadas as principais características geométricas de cada uma das oito salas de aula tipo, bem como o número caixas de entrada e saída de ar de cada uma. É ainda apresentada uma figura exemplar de cada local bem como a sua localização.

Quadro 5.1 – Características geométricas e número de caixas de insuflação e extração de ar presentes em cada tipo de sala da FEUP.

Sala	Nº de lugares	Área (m ²)	Volume (m ³)	Número de caixas de insuflação (AVAC)	Número de caixas de extração (AVAC)	Velocidades de funcionamento do AVAC	Figura
B 002	184	152	607	11	4	1	5.4
B 018	60	57	169	4	1	3	5.5
B 023	99	90	349	4	2	3	5.6
B 027	53	59	173	4	1	3	5.7
B 032**	88	81	313	4	1	3	5.8
B 221	89	168	456	*	4	9	5.9
B 333	21	49	134	*	1	9	5.10
B 334	34	71	192	*	2	9	5.11

* Entrada de ar novo ocorre pela presença de grelhas na fachada do edifício, podendo a sua extração ser realizada por ventilação mecânica;

** Sala com tratamento acústico (cadeiras almofadadas, janelas com maior redução sonora, alcatifa presente em todo o piso, teto e parede de fundo com tratamento acústico, porta de correr com antecâmara e óculo nas portas exteriores)

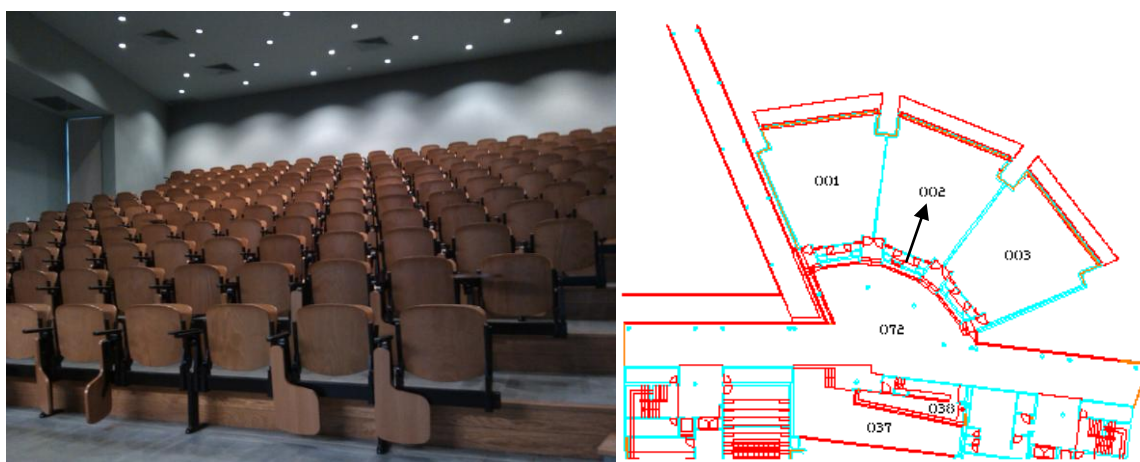


Figura 5.4 – Sala de aula B002 e planta de localização na FEUP [Foto do autor, 48].

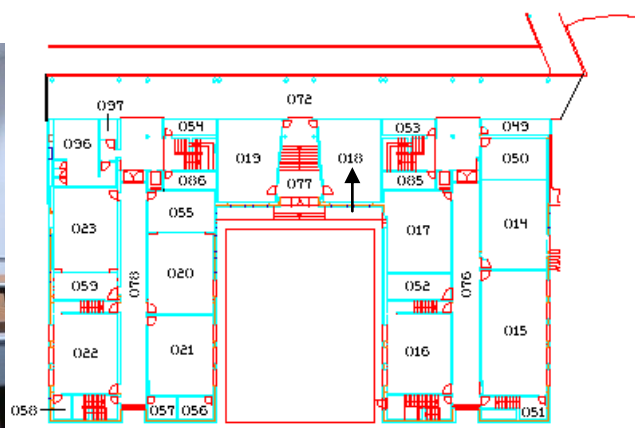


Figura 5.5 – Sala de aula B018 e planta de localização na FEUP [Foto do autor, 48].

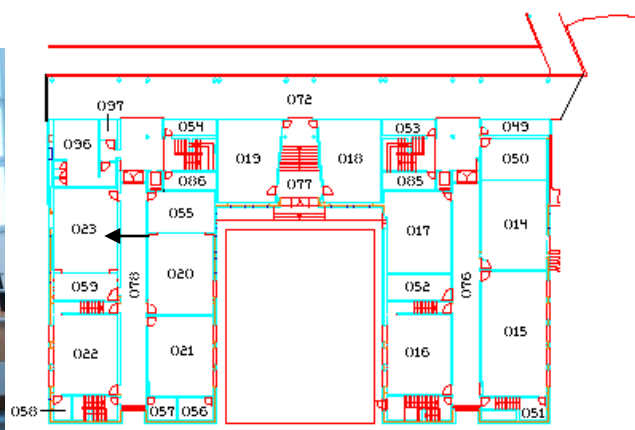
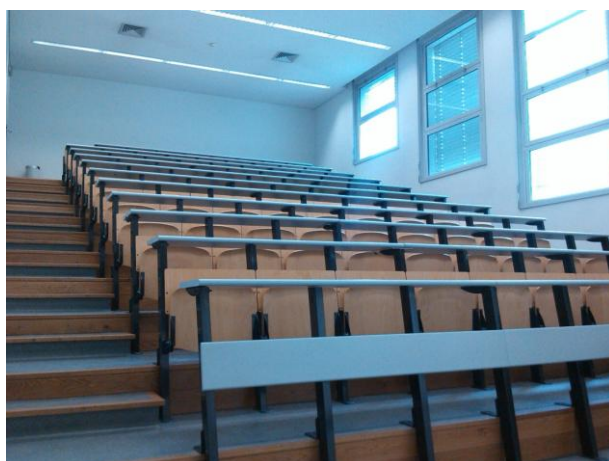


Figura 5.6 – Sala de aula B023 e planta de localização na FEUP [Foto do autor, 48].

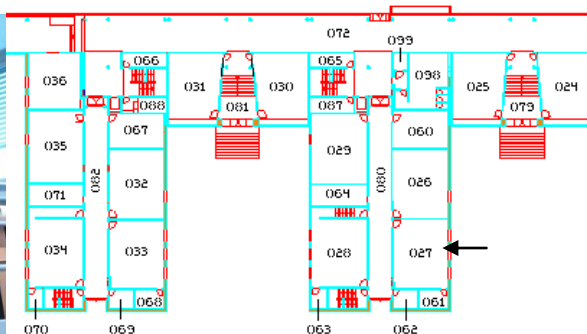


Figura 5.7 – Sala de aula B027 e planta de localização na FEUP [Foto do autor, 48].

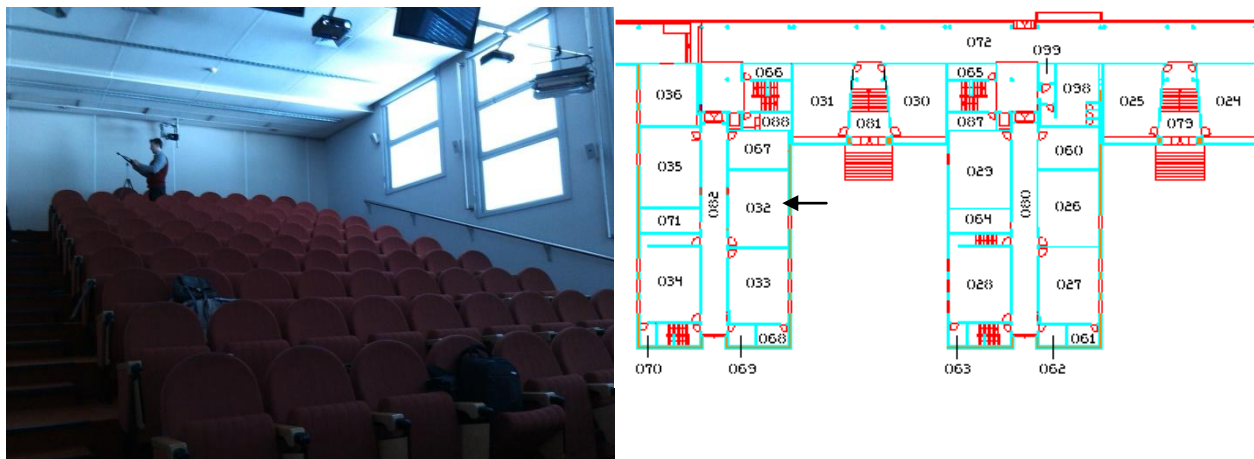


Figura 5.8 – Sala de aula B032 e planta de localização na FEUP [Foto do autor, 48].

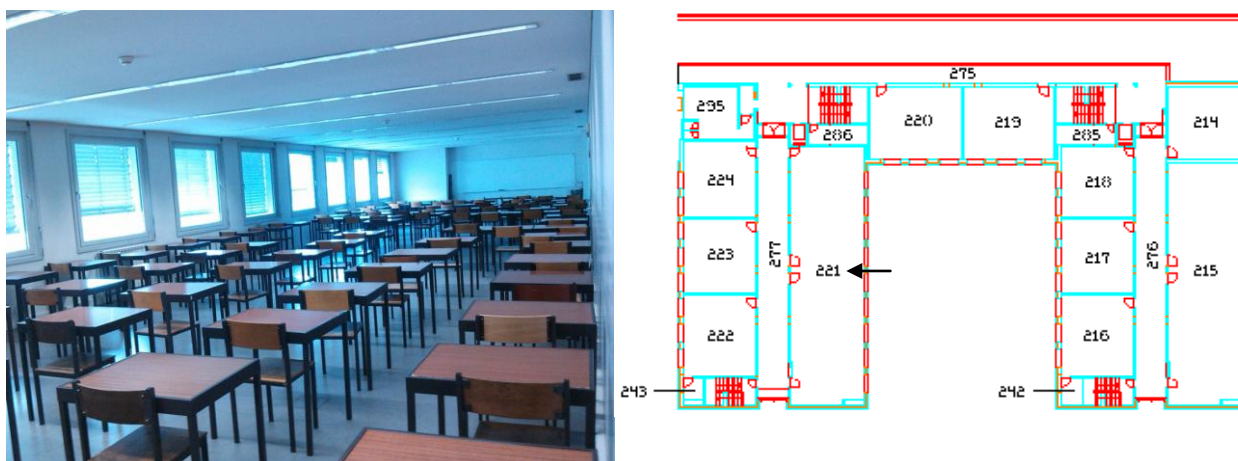


Figura 5.9 – Sala de aula B221 e planta de localização na FEUP [Foto do autor, 48].

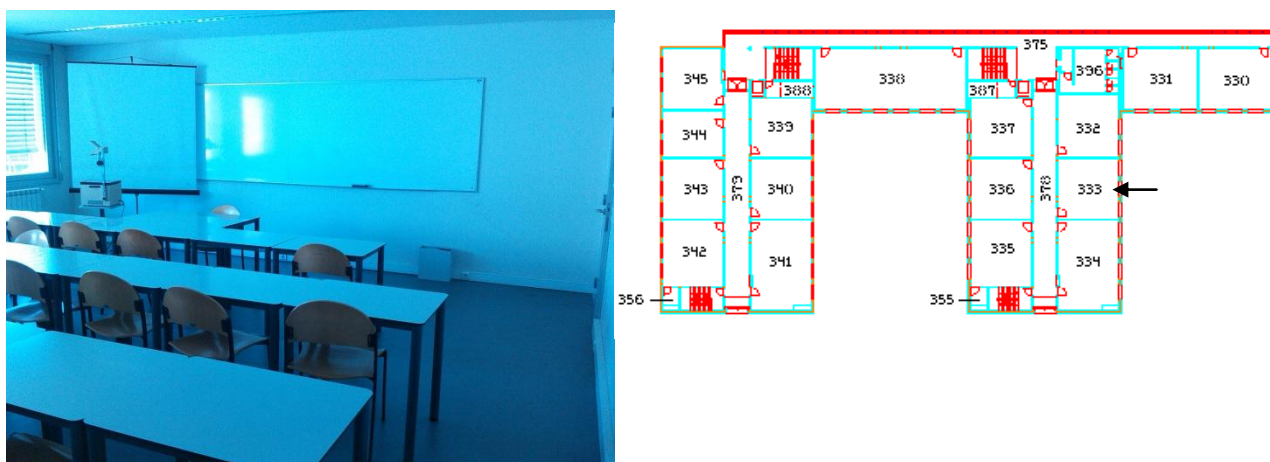


Figura 5.10 – Sala de aula B333 e planta de localização na FEUP [Foto do autor, 48].

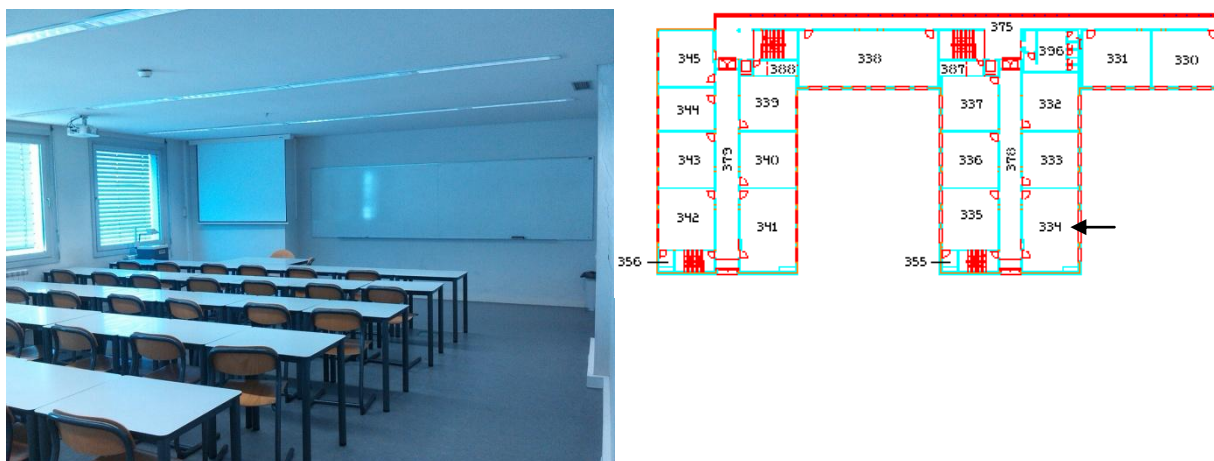


Figura 5.11 – Sala de aula B334 e planta de localização na FEUP [Foto do autor, 48].

5.3. O RUÍDO DO AVAC NA FEUP

5.3.1. OBJETIVOS ACÚSTICOS

A caracterização acústica dos diversos tipos de salas de aula presentes na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto teve por base uma análise objetiva.

Os três parâmetros de medição abordados neste estudo foram: nível de pressão sonora do ruído de fundo, RASTI e Tempo de Reverberação. O nível de pressão sonora do ruído de fundo e o RASTI foram obtidos para duas situações distintas: equipamentos AVAC desligados e ligados.

Na realização dos ensaios procurou-se sempre a sua realização sem a interferência de picos de ruído proveniente dos corredores, algo que nem sempre foi fácil de se obter. Os ensaios realizados decorreram no interior das salas de aula com portas e janelas fechadas, estando estas unicamente ocupadas pelas mesas e cadeiras constituintes integrantes destes locais bem como pelo Eng. António Eduardo Costa juntamente com o autor deste trabalho.

Os horários de medições decorreram durante o período de aulas, de 17 de Abril a 2 de Maio de 2013.

Os ensaios foram realizados pelo Eng. António Eduardo Costa, elemento integrante do Laboratório de Acústica do Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, utilizando os equipamentos do laboratório.

5.3.2. RUÍDO DE FUNDO

5.3.2.1. Metodologia

A medição do ruído de fundo requereu a utilização de um sonómetro da marca *Brüel & Kjær*, modelo 2260 (Figura 5.12) colocado a aproximadamente a 1,25 m do piso, para duas situações distintas: com equipamento AVAC desligado e ligado.

Com o equipamento AVAC desligado, cada medição do nível de pressão sonora do ruído de fundo teve a duração de 10 minutos de forma a se obter estabilidade do ruído provocado pelo tráfego rodoviário e pelo ruído proveniente dos corredores adjacentes às salas de aula. A escolha de dois pontos de medição para cada sala de aula como ilustrados na figura 5.13 caracteriza a totalidade dos locais analisados, vistos estes apresentarem dimensões reduzidas e as fontes sonoras geradoras de

ruído poderem ser consideradas estáveis. Os valores foram medidos em bandas de oitava para as frequências compreendidas entre os 31 e 8.000 Hz.

As medições do ruído de fundo com os equipamentos AVAC ligados foram realizadas seguindo as recomendações da norma NP EN ISO 16032 [78] para cada uma das salas de aula. O tempo de medição em cada ponto foi de um minuto visto o ruído de fundo com o funcionamento destes equipamentos aumentar e por isso estabilizar rapidamente. A medição de um único ponto em cada sala de aula deveu-se ao fato de o número caixas de extração de ar causadores de ruído variar de sala para sala. Assim por forma a serem passíveis de comparação as diversas salas, adotou-se a escolha de um ponto central, equidistante das superfícies envolventes, e assim caracterizador do ruído de fundo. Os valores foram medidos em bandas de 1/3 de oitava para as frequências compreendidas entre 31 e 8.000 Hz.

Os valores obtidos para o ruído de fundo com o sistema AVAC ligado foram depois tratados por forma a poderem ser apresentados em banda de 1/1 de oitava e comparados com as curvas de incomodidade.

A escolha das velocidades de funcionamento dos equipamentos AVAC para a medição do ruído de fundo foram feitas de forma a considerar o funcionamento máximo e “normal” dos equipamentos. A posição máxima permitiu analisar o ruído que cada equipamento é capaz de produzir, sendo que esta posição quase nunca é utilizada. A posição “normal”, por sua vez, é a posição regular na qual se utiliza o sistema AVAC, quando ligado. A posição designada de “normal” não é portanto a velocidade média do equipamento, mas sim a velocidade de funcionamento normal.

Como tal a velocidade de funcionamento normal varia consoante o tipo de equipamentos instalados. A sala B002 só tem uma velocidade de funcionamento. As salas B018, B023, B027 e B032 têm a sua velocidade normal de funcionamento na posição 2, segundo indicações do técnico de AVAC responsável pela gestão dos equipamentos. As salas B221, B333 e B334 devido à ligação dos equipamentos ser realizada de forma individual em cada sala e por isso depender da pessoa que o liga, considerou-se uma velocidade normal de funcionamento na posição 3 (das nove que possui). Esta posição permite que o ruído produzido pelos equipamentos não seja de tal forma exagerado que permita o desenrolar das atividades escolares.

No quadro 5.2 são apresentadas as velocidades de funcionamento normais e máximas dos equipamentos.



Figura 5.12- Sonómetro da marca *Brüel & Kjær*, modelo 2260 [Foto do autor].

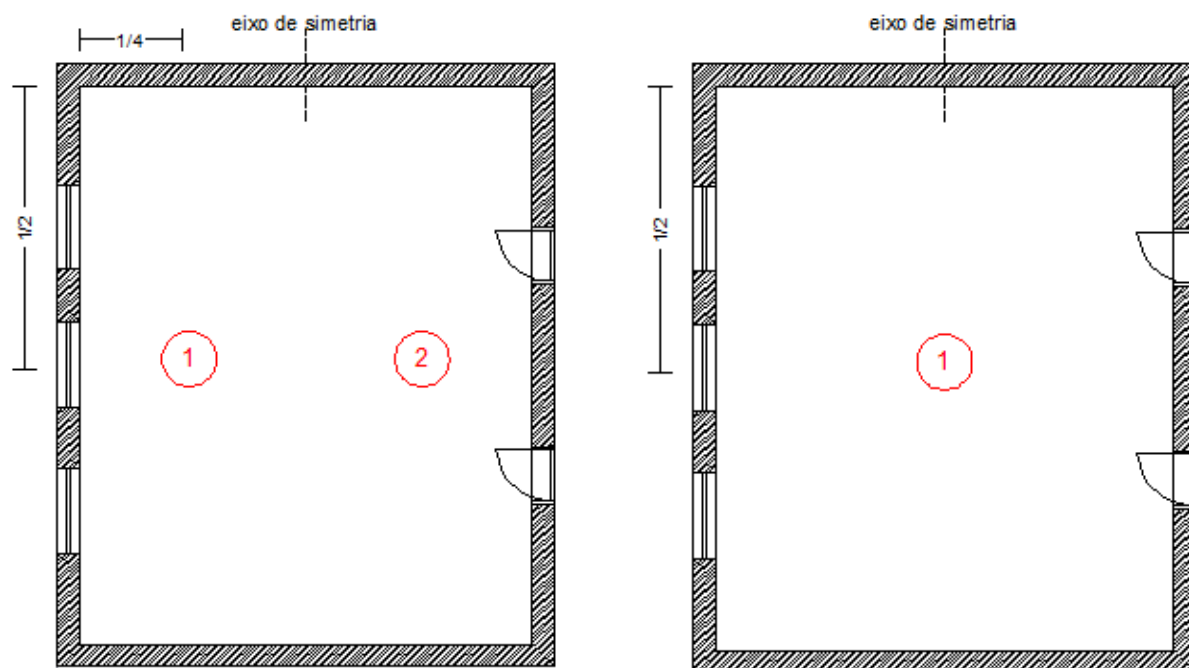


Figura 5.13 – Localização dos pontos de medição, sem e com AVAC ligado, em cada sala (esq. Desligado, dir. Ligado).

Quadro 5.2 – Velocidades normais e máximas de funcionamento dos equipamentos AVAC segundo o tipo de sala da FEUP.

Sala	Velocidades existentes para funcionamento do AVAC	Velocidade “normal” de funcionamento escolhida	Velocidade máxima de funcionamento escolhida
B002	1	*	1
B018	3	2	3
B023	3	2	3
B027	3	2	3
B032	3	2	3
B221	9	3	9
B333	9	3	9
B334	9	3	9

* Não dispõe de funcionamento na posição normal

5.3.2.2. Resultados

a) Valores por sala

Os valores do nível de pressão sonora do ruído de fundo obtidos para as duas situações anteriormente referidas, com e sem sistema AVAC em funcionamento, são apresentados nos quadros 5.3 a 5.5. Os valores referentes ao parâmetro $L_{\text{médio}}$, foram calculados através da média energética, por banda de

frequência, relativamente aos dois pontos de medição de cada sala. Nestes quadros são também incluídos os níveis sonoros contínuos equivalentes (L_{Aeq}) que resultam da adição algébrica dos valores referentes ao parâmetro L_{medio} com a curva de ponderação A. Os valores são apresentados nas bandas de oitava dos 31 aos 8.000 Hz. As figuras 5.14 a 5.21 apresentam gráficos com os valores dos níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para as diversas salas com e sem sistema AVAC em funcionamento.

Quadro 5.3 – Níveis de pressão sonora contínuos equivalentes (L_{eq}) e filtrados A (L_{Aeq}) para as diferentes salas, sem o sistema AVAC em funcionamento.

Sala	Ponto de medição	Freq. (Hz)									Global (dB)
		31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
B002	L_{eq1}	37,3	38,0	43,4	39,4	39,1	32,2	26,6	21,7	14,7	47,2
	L_{eq2}	42,4	38,5	44,8	40,4	37,7	31,1	25,7	21,0	13,9	48,7
	L_{medio}	40,6	38,3	44,1	40,0	38,4	31,7	26,2	21,3	14,4	48,0
	L_{Aeq}	0,6	12,3	28,6	35,5	35,4	31,7	27,2	22,3	13,4	40,0
B018	L_{eq1}	38,3	40,0	36,7	38,0	34,2	29,1	25,3	19,8	15,2	45,0
	L_{eq2}	38,1	39,3	37,8	37,9	34,0	30,3	26,0	21,4	16,8	45,0
	L_{medio}	38,2	39,7	37,3	38,0	34,1	29,7	25,7	20,7	16,1	45,0
	L_{Aeq}	0*	13,7	21,8	29,5	31,1	29,7	26,7	21,7	15,1	36,0
B023	L_{eq1}	43,7	40,9	35,5	34,9	34,4	29,6	26,1	20,8	15,2	46,7
	L_{eq2}	45,9	41,7	39,3	39,4	34,0	29,3	26,1	20,6	15,9	48,7
	L_{medio}	44,9	41,3	37,8	37,7	34,2	29,5	26,1	20,7	15,6	47,8
	L_{Aeq}	4,9	15,3	22,3	29,2	31,2	29,5	27,1	21,7	14,6	36,0
B027	L_{eq1}	52,2	43,5	39,8	37,0	34,8	29,2	26,0	23,3	19,0	53,2
	L_{eq2}	52,3	43,8	42,9	37,7	36,7	30,1	26,0	23,2	20,5	53,5
	L_{medio}	52,3	43,6	41,6	37,3	35,8	29,7	26,0	23,3	19,8	53,4
	L_{Aeq}	12,3	17,6	26,1	28,8	32,8	29,7	27	24,3	18,8	36,9
B032	L_{eq1}	46,2	32,1	31,9	26,8	27,3	24,6	17,1	12,5	11,0	46,6
	L_{eq2}	47,4	34,3	33,4	27,9	27,9	25,4	17,7	13,1	11,4	47,9
	L_{medio}	46,8	33,3	32,7	27,4	27,6	25,0	17,4	12,8	11,3	47,3
	L_{Aeq}	6,8	7,3	17,2	18,9	24,6	25,0	18,4	13,8	10,3	29,3
B221	L_{eq1}	48,1	48,7	40,2	39,2	36,8	31,3	26,5	22,5	14,2	52,2
	L_{eq2}	50,2	48,4	40,4	39,4	36,8	30,8	26,0	21,9	13,8	53,0
	L_{medio}	49,3	48,6	40,3	39,3	36,8	31,1	26,3	22,2	14,0	52,6
	L_{Aeq}	9,3	22,6	24,8	30,8	33,8	31,1	27,3	23,2	13,0	37,9

Quadro 5.3 – Níveis de pressão sonora contínuos equivalentes (L_{eq}) e filtrados A (L_{Aeq}) para as diferentes salas, sem o sistema AVAC em funcionamento (continuação).

Sala	Ponto de medição	Freq. (Hz)									Global (dB)
		31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
B333	L_{eq1}	48,3	47,4	41,4	39,0	36,6	33,4	28,0	18,9	13,1	51,8
	L_{eq2}	47,5	47,5	41,4	39,1	37,8	33,1	28,0	20,2	14,9	51,6
	L_{medio}	47,9	47,5	41,4	39,1	37,2	33,3	28,0	19,6	14,1	51,7
	L_{Aeq}	7,9	21,5	25,9	30,6	34,2	33,3	29,0	20,6	13,1	38,7
B334	L_{eq1}	47,9	43,5	41,6	41,2	39,3	36,7	31,2	22,0	15,2	51,0
	L_{eq2}	47,7	43,2	41,4	41,6	39,1	36,4	31,8	22,5	15,6	50,9
	L_{medio}	47,8	43,4	41,5	41,4	39,2	36,6	31,5	22,3	15,4	50,9
	L_{Aeq}	7,8	17,4	26,0	32,9	36,2	36,6	32,5	23,3	14,4	41,2

* Não se consideraram aceitáveis valores negativos.

Quadro 5.4 – Níveis de pressão sonora contínuos equivalentes (L_{eq}) e filtrados A (L_{Aeq}) para as diferentes salas, com o sistema AVAC em funcionamento no máximo.

Sala	Parâmetro	Freq. (Hz)									Global (dB)
	(Ponto de medição 1)	31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
B002	L _{eq} (AVAC) máx	44,7	46,8	51,2	44,3	38,5	34,1	27,6	23,2	14,8	53,9
	L _{Aeq} (AVAC) máx	4,7	20,8	35,7	35,8	35,5	34,1	28,6	24,2	13,8	41,7
B018	L _{eq} (AVAC) máx	52,7	59,7	58,2	55,5	51,1	52,6	43,8	38,1	30,6	63,9
	L _{Aeq} (AVAC) máx	12,7	33,7	42,7	47,0	48,1	52,6	44,8	39,1	29,6	55,5
B023	L _{eq} (AVAC) máx	58,6	60,1	54,5	50,7	45,4	41,8	36,8	31,1	24,5	63,4
	L _{Aeq} (AVAC) máx	18,6	34,1	39,0	42,2	42,4	41,8	37,8	32,1	23,5	48,3
B027	L _{eq} (AVAC) máx	63,4	71,6	73,6	62,7	53,9	52,5	46,7	35,8	28,3	76,2
	L _{Aeq} (AVAC) máx	23,4	45,6	58,1	54,2	50,9	52,5	47,7	36,8	27,3	61,2
B032	L _{eq} (AVAC) máx	62,5	51,8	47,2	43,6	38,2	36,1	29,0	21,7	17,2	63,0
	L _{Aeq} (AVAC) máx	22,5	25,8	31,7	35,1	35,2	36,1	30,0	22,7	16,2	41,4
B221	L _{eq} (AVAC) máx	50,2	50,9	60,8	61,0	62,1	49,5	42,5	34,9	24,4	66,5
	L _{Aeq} (AVAC) máx	10,2	24,9	45,3	52,5	59,1	49,5	43,5	35,9	23,4	60,6
B333	L _{eq} (AVAC) máx	49,7	52,5	55,8	64,7	61,8	54,3	45,2	38,7	20,5	67,3
	L _{Aeq} (AVAC) máx	9,7	26,5	40,3	56,2	58,8	54,3	46,2	39,7	19,5	61,8
B334	L _{eq} (AVAC) máx	48,5	55,5	59,8	65,6	62,8	57,7	51,1	47,0	31,3	68,8
	L _{Aeq} (AVAC) máx	8,5	29,5	44,3	57,1	59,8	57,7	52,1	48,0	30,3	63,6

Quadro 5.5 – Níveis de pressão sonora contínuos equivalentes (L_{eq}) e filtrados A (L_{Aeq}) para as diferentes salas, com o sistema AVAC em funcionamento normal.

Sala	Parâmetro (Ponto de medição 1)	Freq. (Hz)									Global (dB)
		31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
B002*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B018	$L_{eq}(AVAC)$ normal	47,4	52,4	49,6	47,0	44,7	42,2	33,4	29,4	23,0	56,2
	$L_{Aeq}(AVAC)$ normal	7,4	26,4	34,1	38,5	41,7	42,2	34,4	30,4	22,0	46,6
B023	$L_{eq}(AVAC)$ normal	58,0	54,0	51,4	43,5	43,9	37,7	30,3	22,5	14,3	60,3
	$L_{Aeq}(AVAC)$ normal	18,0	28,0	35,9	35,0	40,9	37,7	31,3	23,5	13,3	44,4
B027	$L_{eq}(AVAC)$ normal	59,2	64,6	67,1	53,1	46,8	44,8	36,1	24,8	19,6	69,6
	$L_{Aeq}(AVAC)$ normal	19,2	38,6	51,6	44,6	43,8	44,8	37,1	25,8	18,6	53,8
B032	$L_{eq}(AVAC)$ normal	53,9	45,6	40,6	34,4	30,5	27,6	19,8	14,0	12,7	54,7
	$L_{Aeq}(AVAC)$ normal	13,9	19,6	25,1	25,9	27,5	27,6	20,8	15,0	11,7	33,3
B221	$L_{eq}(AVAC)$ normal	49,7	48,7	54,6	58,5	45,1	39,7	33,0	27,8	22,2	60,8
	$L_{Aeq}(AVAC)$ normal	9,7	22,7	39,1	50,0	42,1	39,7	34,0	28,8	21,2	51,3
B333	$L_{eq}(AVAC)$ normal	48,1	47,1	51,7	54,4	50,1	42,6	33,4	24,1	16,6	58,2
	$L_{Aeq}(AVAC)$ normal	8,1	21,1	36,2	45,9	47,1	42,6	34,4	25,1	15,6	50,6
B334	$L_{eq}(AVAC)$ normal	48,0	50,6	55,6	61,8	58,1	50,8	43,9	39,1	23,6	64,5
	$L_{Aeq}(AVAC)$ normal	8,0	24,6	40,1	53,3	55,1	50,8	44,9	40,1	22,6	58,5

* Não dispõe de funcionamento normal

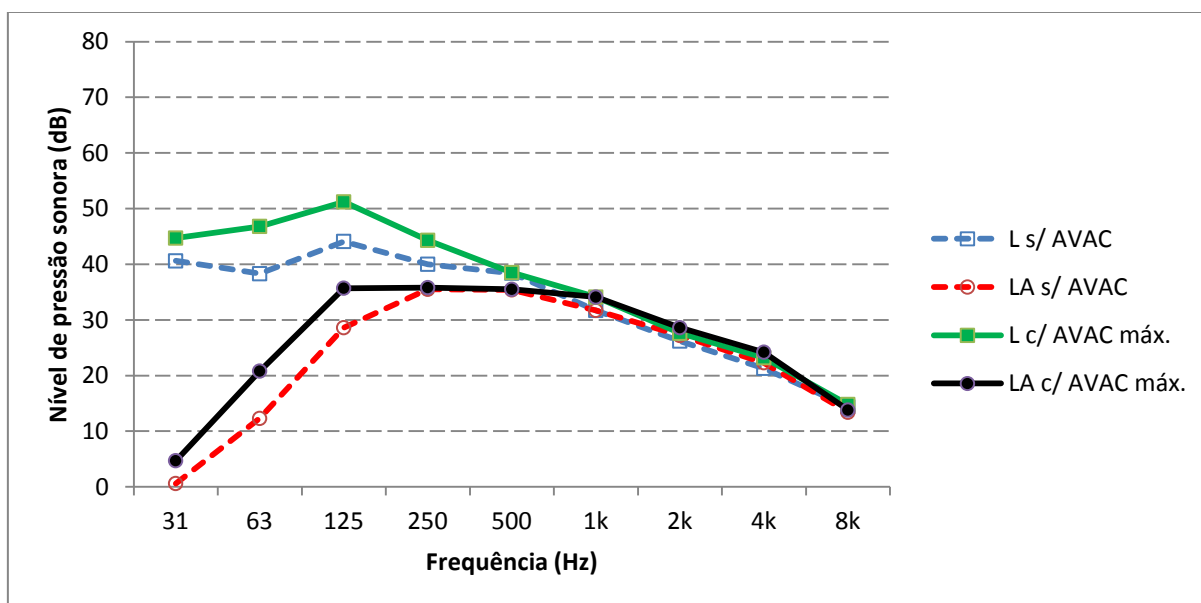


Figura 5.14 – Níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para a sala B002 sem sistema AVAC e com AVAC no máximo funcionamento.

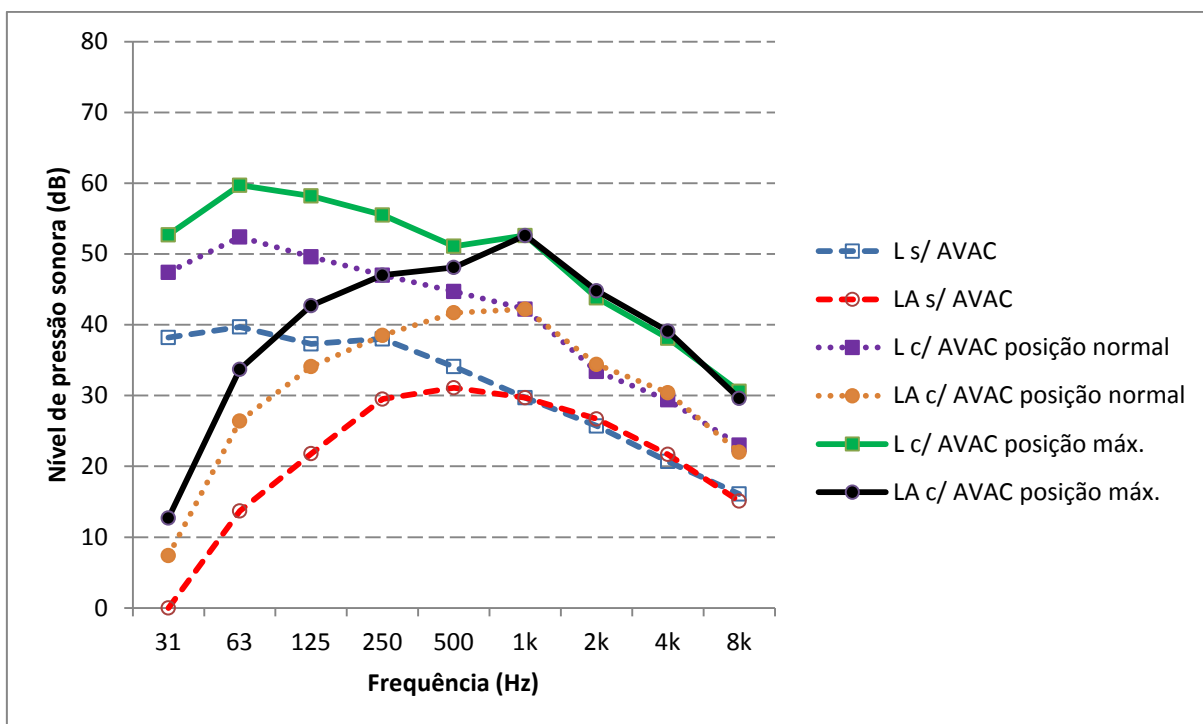


Figura 5.15 – Níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para a sala B018 sem sistema AVAC e com AVAC em funcionamento nas posições normal e máxima.

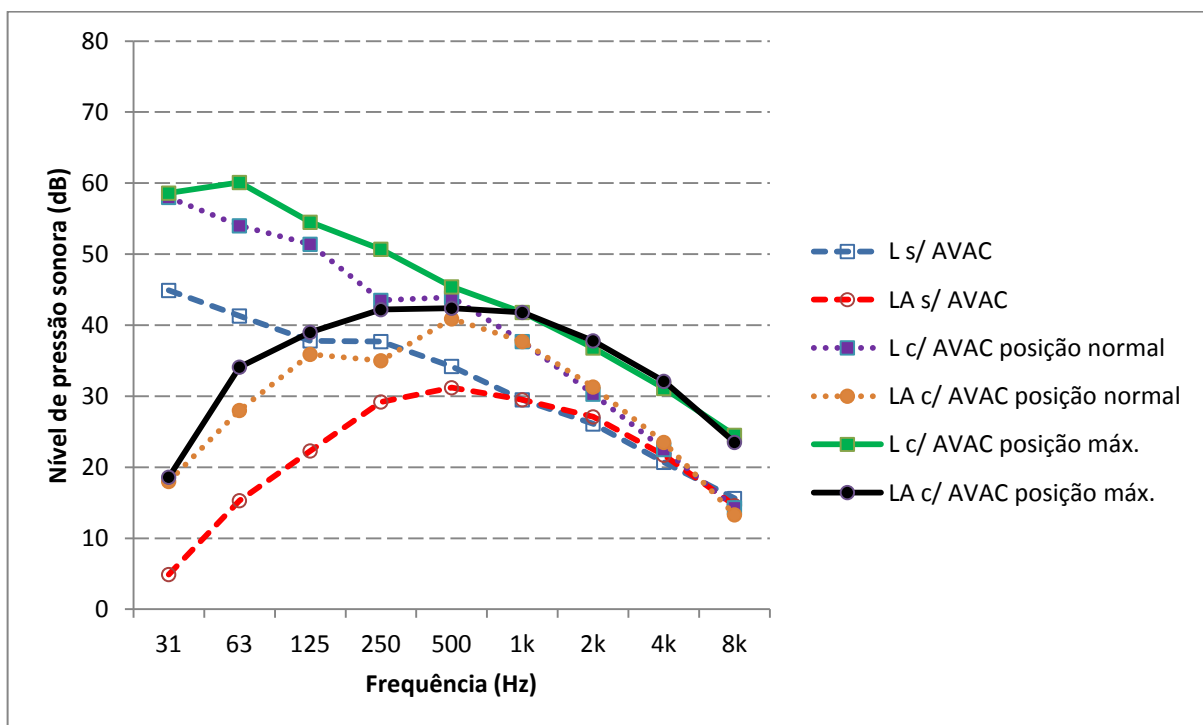


Figura 5.16 – Níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para a sala B023 sem sistema AVAC e com AVAC em funcionamento nas posições normal e máxima.

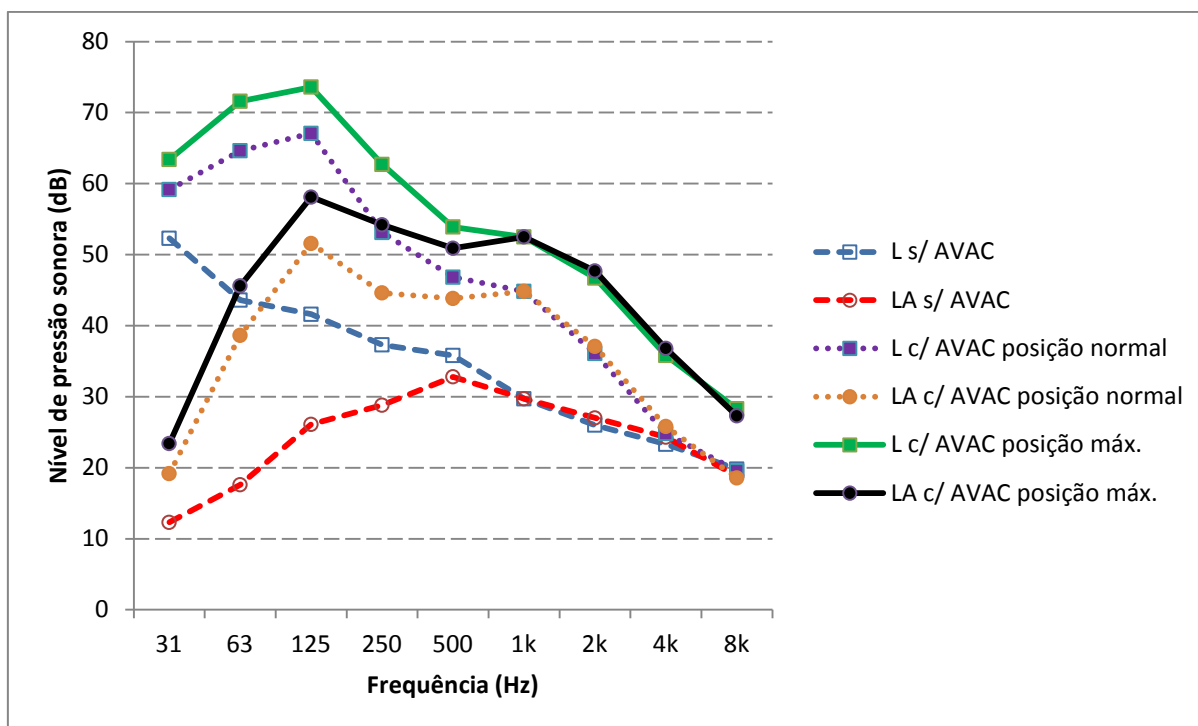


Figura 5.17 – Níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (LA) do ruído de fundo para a sala B027 sem sistema AVAC e com AVAC em funcionamento nas posições normal e máxima.

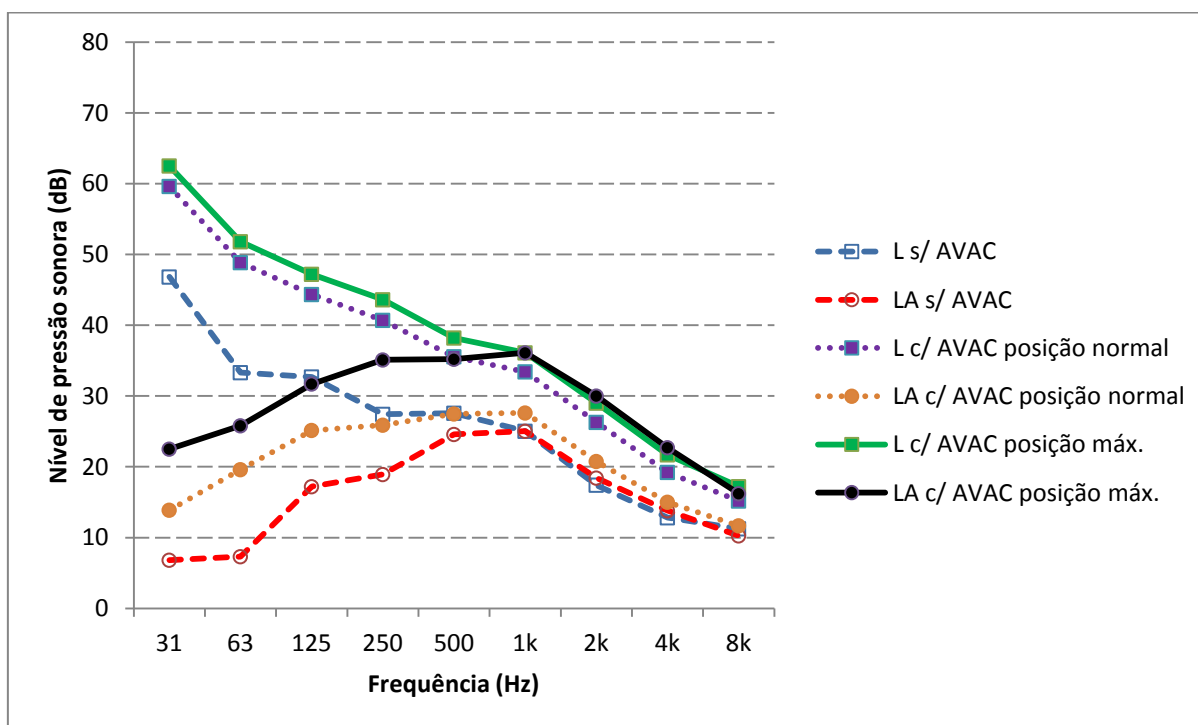


Figura 5.18 – Níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (LA) do ruído de fundo para a sala B032 sem sistema AVAC e com AVAC em funcionamento nas posições normal e máxima.

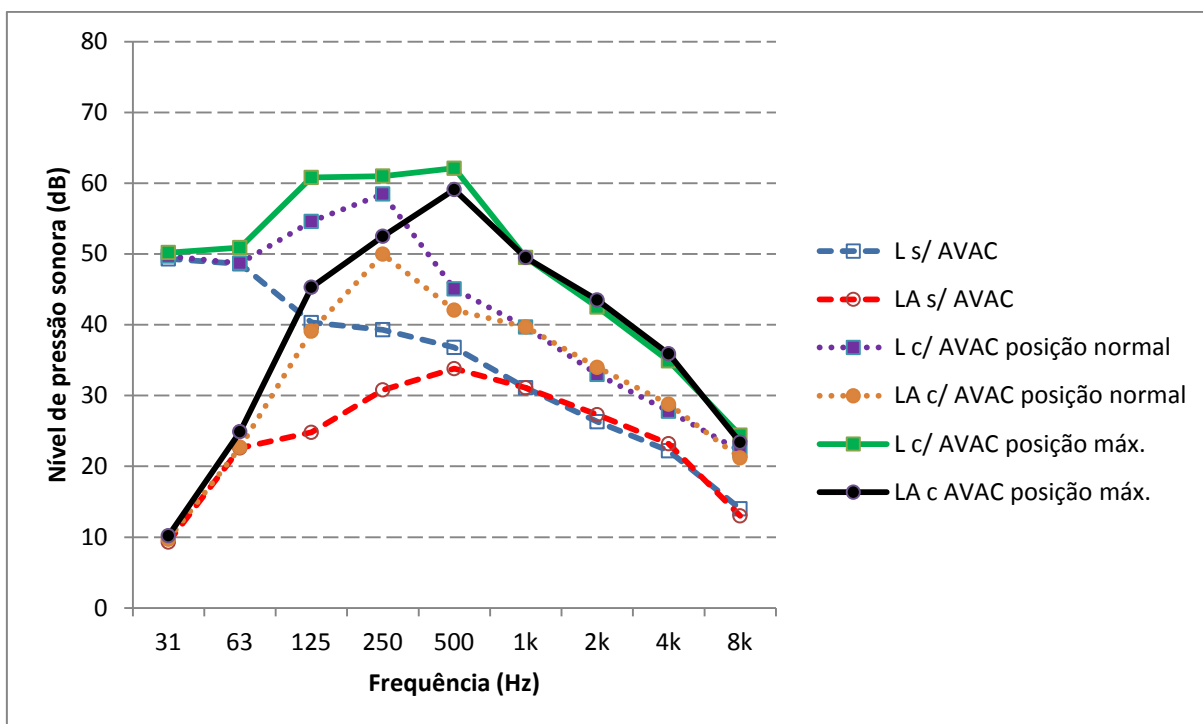


Figura 5.19 – Níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (LA) do ruído de fundo para a sala B221 sem sistema AVAC e com AVAC em funcionamento nas posições normal e máxima.

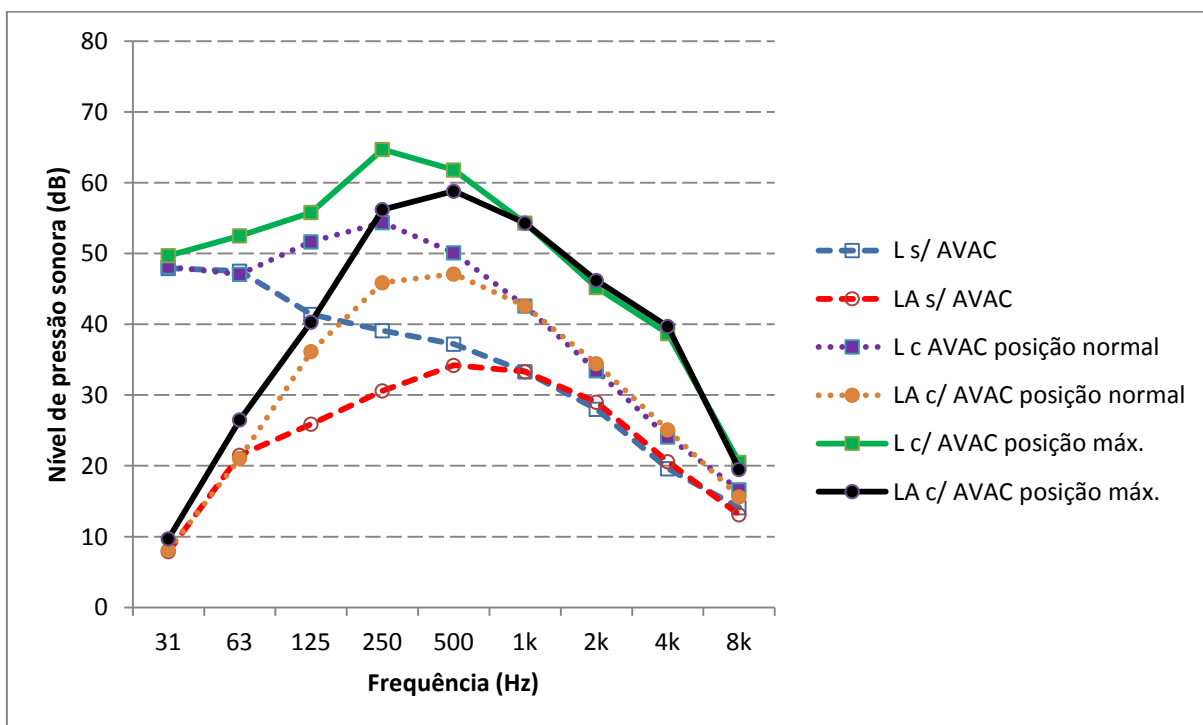


Figura 5.20 – Níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (LA) do ruído de fundo para a sala B333 sem sistema AVAC e com AVAC em funcionamento nas posições normal e máxima.

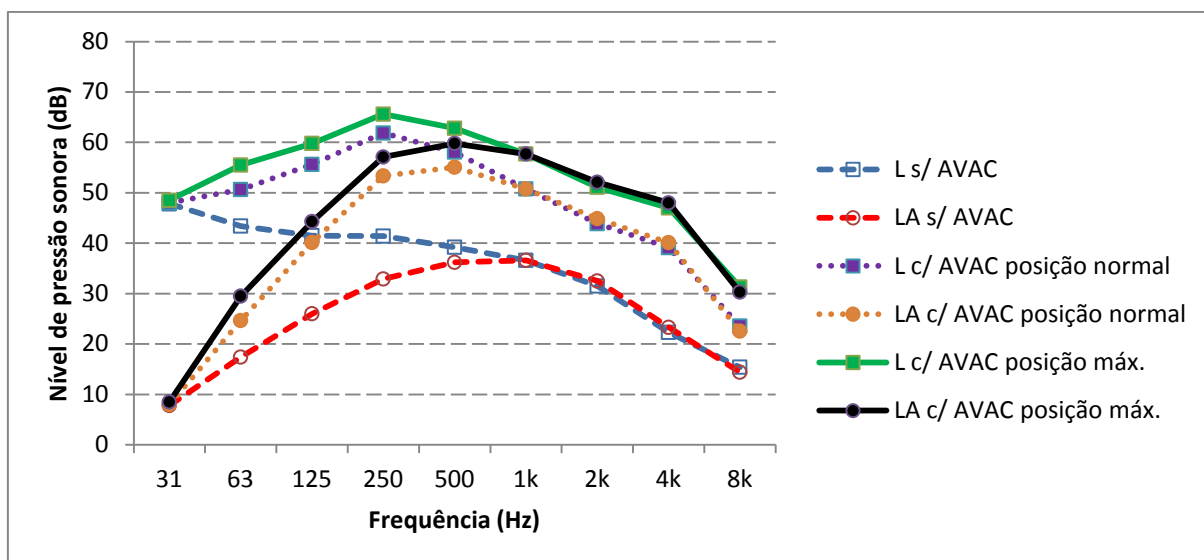


Figura 5.21 - Níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para a sala B334 sem sistema AVAC e com VAC em funcionamento nas posições normal e máxima.

b) Análise global

Os valores médios globais do nível de pressão sonora e nível sonoro do ruído de fundo sem e com AVAC são apresentados no quadro 5.6. Nas figuras 5.22 e 5.24 são apresentados os valores relativos à diferença entre os níveis sonoros do ruído de fundo com equipamentos AVAC a funcionar no máximo e níveis sonoros do ruído de fundo sem AVAC, por banda de frequência e resultados globais, para cada sala. Na Figura 5.23 são apresentados os resultados nos níveis sonoros do ruído de fundo produzidos pelos equipamentos AVAC a funcionar no máximo para cada sala.

Quadro 5.6 – Nível de pressão sonora e nível de ruído de fundo para as diversas salas, com e sem funcionamento dos equipamentos AVAC.

Sala	L (dB)			L_A (dB)			ΔL (dB)		ΔL_A (dB)	
	Sem AVAC	AVAC máx.	AVAC normal	Sem AVAC	AVAC máx.	AVAC normal	=máx.-sem	=normal-sem	=máx.-sem	=normal-sem
B002	48,0	53,9*		40,0	41,7*		6*		2*	
B018	45,0	63,9	56,2	36,0	55,5	46,6	19	11	20	11
B023	47,8	63,4	60,3	36,0	48,3	44,4	16	13	12	8
B027	53,4	76,2	69,6	36,9	61,2	53,8	23	16	24	17
B032	47,3	63,0	54,7	29,3	41,4	33,3	16	7	12	4
B221	52,6	66,5	60,8	37,9	60,6	51,3	14	8	23	13
B333	51,7	67,3	58,2	38,7	61,8	50,6	16	7	23	12
B334	50,9	68,8	64,5	41,2	63,6	58,5	18	14	22	17

* Só dispõe um regime de funcionamento.

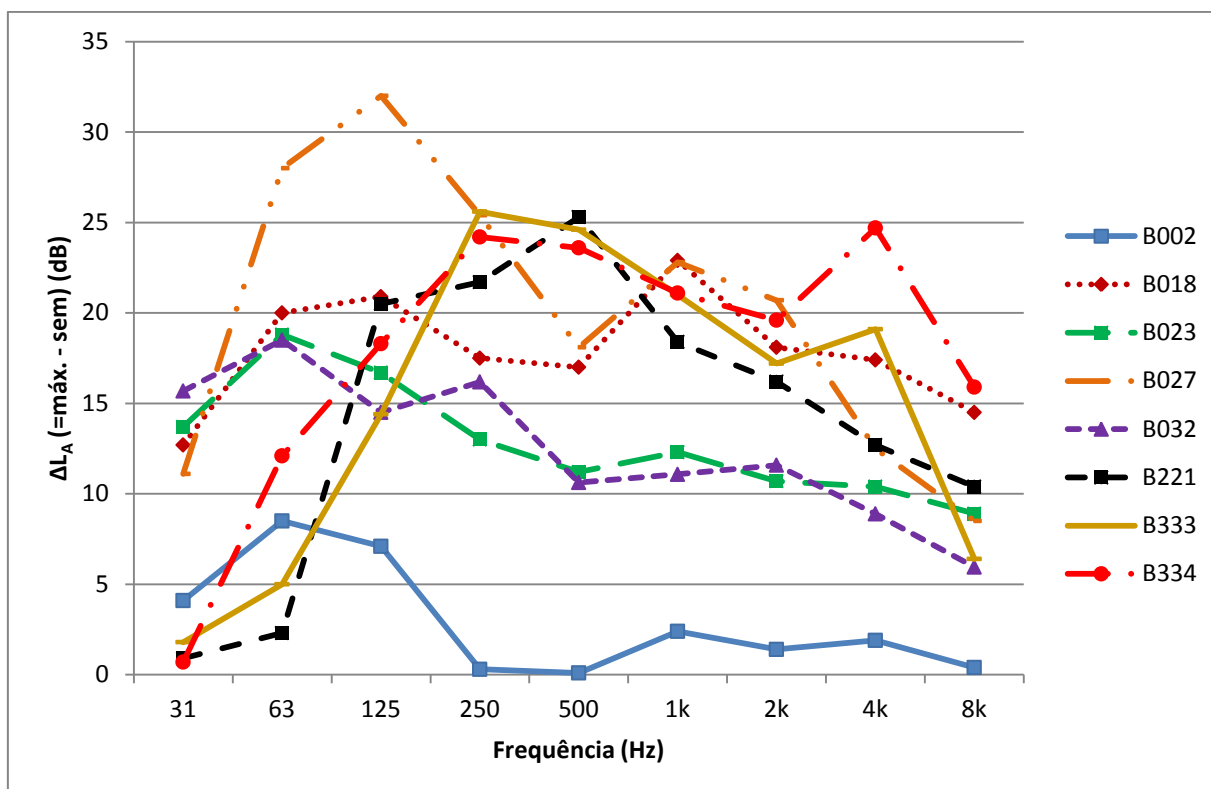


Figura 5.22 – Diferença entre os níveis sonoros do ruído de fundo com equipamentos AVAC a funcionar no máximo e níveis sonoros do ruído de fundo sem AVAC, por banda de frequência para cada sala.

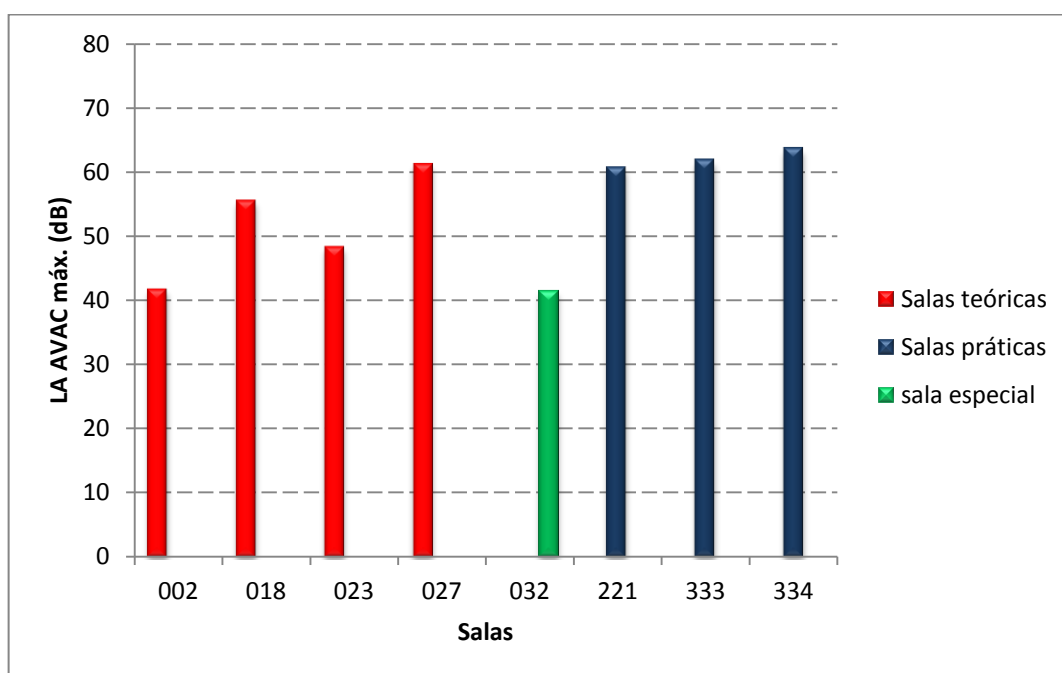


Figura 5.23 – Níveis sonoros do ruído de fundo produzidos pelos equipamentos AVAC nos seus funcionamentos máximo para cada sala de aula.

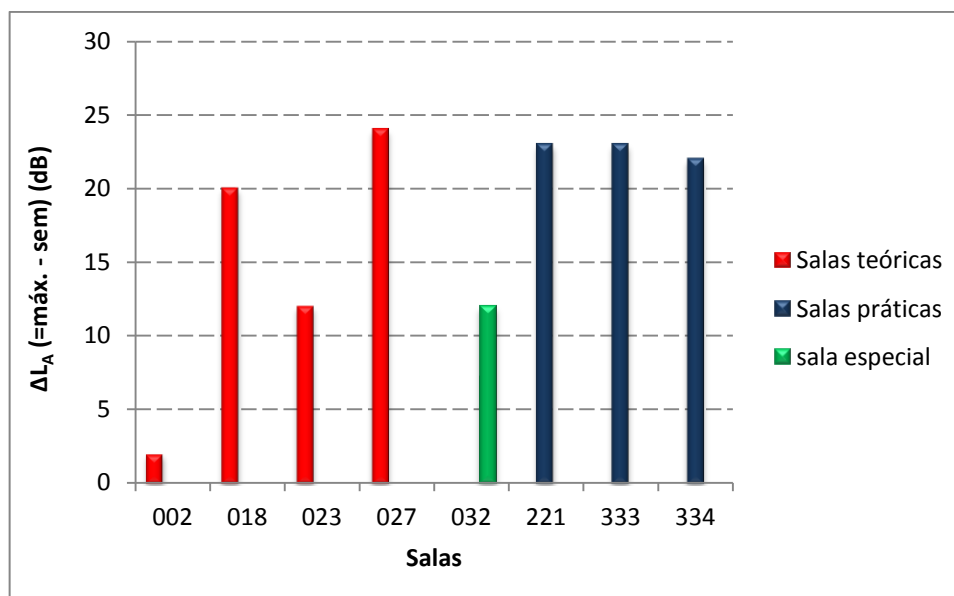


Figura 5.24 – Diferença entre os níveis sonoros do ruído de fundo produzidos pelos equipamentos AVAC nos seus funcionamentos máximos e níveis sonoros do ruído de fundo sem AVAC, para cada sala de aula.

Analisando os valores registados no quadro 5.3 verifica-se que o ruído de fundo sem o funcionamento dos sistemas AVAC para os dois pontos de análise (a ¼ da parede da fachada e a ¼ da parede do corredor) apresenta valores próximos entre si. Fazendo uma análise dos valores, verifica-se que os pontos mais próximos do corredor apresentam por regra valores mais elevados que os pontos mais próximos da fachada. Isto acontece devido ao ruído proveniente dos espaços interiores do edifício superarem os valores do ruído exterior. Exemplos disso foram presenciados como a passagem de pessoas a conversar nos corredores, o uso de secadores de mãos da casa de banho adjacentes a algumas salas de aula e até o bater de portas. Por outro lado quando não existe a presença notória de ruído vindo do interior do edifício, os valores nos dois pontos de medição verificam-se semelhantes. Tal poderá ser explicado devido às salas apresentarem dimensões reduzidas e os pontos de medição serem assim sujeitos às mesmas intensidades de ruído exterior.

De todas as salas analisadas e observando os valores do quadro 5.6, verifica-se que a sala B032, apresenta o melhor resultado para o nível de ruído de fundo (sem AVAC) com um nível de pressão sonora situado em 47 dB e um corresponde nível sonoro de 29 dB(A). Tal deve-se ao tipo de tratamento acústico que a sala incorpora.

Das restantes salas do piso zero devido a estas não apresentarem nenhum tipo de tratamento acústico, os valores do nível sonoro do ruído de fundo (sem AVAC) são bastante superiores à sala B032, variando entre 36 a 40 dB(A), ou seja 7 a 11 dB(A) superiores. Estas salas não apresentam portas que isolem convenientemente o ruído, não possuem batente duplo, nem borracha nas frinchas e não existe antecâmara para o corredor.

No entanto a sala B002 comparativamente às restantes salas do piso zero apresenta o valor mais elevado do nível sonoro do ruído de fundo, atingindo o valor médio de 40 dB(A), enquanto as restantes salas apresentam valores entre 36 a 37 dB(A). Este fato deve-se essencialmente à posição exposta que está sala ocupa perante o corredor central. Enquanto as restantes salas do piso zero estão situadas em corredores secundários que têm ligação ao corredor central, o acesso à sala B002 é feito diretamente a partir do corredor central.

O corredor central é o espaço do edifício B no qual o valor do ruído de fundo é mais elevado. Isto porque na sua constituição não tem materiais acusticamente absorventes para o uso que deste é feito, o que estaria ilegal até à luz do atual RRAE. Devido a ser este o espaço pelo qual as pessoas preferencialmente se deslocam ao longo do edifício, este deveria ter absorção sonora no teto e material absorvente na caixa-de-ar dos tetos perfurados existentes nos corredores.

As salas relativas aos pisos dois e três apresentam valores do nível sonoro de ruído de fundo sem AVAC a variarem entre si em cerca de 3 dB(A). Os valores medidos nestas salas não foram muito afetados pelo ruído proveniente dos corredores adjacentes, devido às medições terem sido realizadas em horários fora de aulas. No entanto a sala B334 é a que apresenta maior valor para este parâmetro, cerca de 41 dB(A). Superior em 3 dB(A) em relação as outras salas. Este fato pode ser explicado devido a esta sala apresentar as caixilharias das janelas um pouco degradadas.

O elevado ruído nas salas destes pisos é também consequência das grelhas de entrada de ar dispostas na fachada.

Com a entrada em funcionamento dos sistemas AVAC é possível observar a subida das curvas dos níveis de pressão sonora e níveis sonoros do ruído de fundo em relação ao ruído de fundo residual através das figuras 5.14 a 5.21 e dos quadros 5.4 e 5.5.

Denota-se assim a variação das subidas das curvas do ruído de fundo, com o sistema ligado (em posição normal ou máxima), ao longo das frequências. Destas curvas depreende-se que os sistemas AVAC ao longo das salas não influenciam o espectro sonoro da mesma forma ao longo das diferentes frequências. Nas salas em que a ligação do sistema é manual, o ruído provocado por estes equipamentos na velocidade máxima atinge um valor máximo relativo ao nível sonoro do ruído de fundo na frequência de 500 Hz, sendo que a mudança de velocidade para a normal faz com que o valor máximo relativo à sala B221 passe dos 500 Hz para os 250 Hz mantendo-se as outras duas salas nos 500 Hz.

Nas salas em que a ligação do sistema é realizado pela gestão técnica centralizada o nível sonoro do ruído de fundo com AVAC apresenta valores máximos em diferentes frequências para as diversas salas. Assim com os equipamentos no máximo, a sala B002 apresenta o valor máximo nas frequências de 125 e 1k Hz, a B018 e B032 na frequência de 1k Hz, a B023 nas frequências de 250 a 1k Hz e a B027 na frequência de 125 Hz. Com os equipamentos na velocidade normal as salas B018 e B032 apresentam o máximo nas frequências de 500 e 1k Hz, a B023 na frequência de 500 Hz e a B027 mantém-se na frequência de 125 Hz.

Quando analisada a forma das curvas nos níveis sonoros do ruído de fundo com AVAC é possível verificar que estas tomam configurações muito próximas por banda de frequência seja qual for a velocidade do sistema AVAC adotada. Daqui conclui-se que os equipamentos influenciam as bandas de frequências de forma mais ou menos constante seja qual for a velocidade de funcionamento. Como tal, a escolha do equipamento deverá ser feita de modo a que o ruído máximo produzido por estes equipamentos não interfira com a gama de frequências essenciais ao domínio da palavra.

Através da análise da figura 5.22 é possível verificar que os equipamentos AVAC induzem aumentos diferenciados dos níveis sonoros do ruído de fundo ao longo das frequências. Conclui-se também que os equipamentos afetam o ruído de fundo de forma diferente em cada frequência dependendo da sala de análise.

Analisando a figura 5.23 e o quadro 5.6 verifica-se que a sala B032 apresenta o melhor resultado para o nível sonoro do ruído de fundo provocado pelos equipamentos de AVAC no seu funcionamento

máximo (41 dB(A)), situando-se a sala B002 a apenas 0,3 dB(A) desta. As restantes salas do piso zero apresentam valores entre 48 e 61 dB(A), correspondente a uma variação de 13 dB(A) entre si.

Para as salas dos pisos superiores, o nível de ruído provocado pelos equipamentos apresenta valores entre 61 e 64 dB(A), correspondente a uma variação de 3 dB(A). Destas salas pode-se concluir que os equipamentos instalados produzem um aumento do ruído de fundo na mesma ordem de grandeza quando estes se encontram a funcionar no máximo.

Para os equipamentos a funcionar na posição normal o valor obtido no piso zero na sala B032 foi de 33 dB(A), sendo que as restantes salas deste piso apresentaram valores entre 44 e 54 dB(A), o que correspondente a uma variação de 10 dB(A). As salas dos pisos superiores por sua vez, apresentam valores entre 51 e 59, correspondente a uma variação de 8 dB(A).

Relativamente aos valores da diferença entre o nível de ruído provocado pelos equipamentos a funcionar no máximo e o nível sonoro do ruído de fundo residual (ΔL_A) (Figura 5.24), fica possível verificar o aumento do nível sonoro que estes equipamentos inserem. Assim conclui-se que o equipamento *Rooftop* induz um aumento de 2 dB(A) em relação ao ruído de fundo residual e que os equipamentos do tipo UTA's induzem variações no piso zero entre 12 a 24 dB(A) e 22 a 23 dB(A) nos pisos superiores. Constata-se assim uma certa homogeneidade nos valores dos pisos superiores e uma grande heterogeneidade no piso zero relativamente às salas com UTA's.

c) Curvas de Incomodidade

A análise da incomodidade provocada pelos equipamentos AVAC foi realizada com base na comparação entre os níveis de pressão sonora do ruído de fundo para as diferentes velocidades de funcionamento dos equipamentos com as *curvas de incomodidade NC* e *NR*, previamente abordadas no capítulo 2. Para tal recorreu-se a ferramentas de cálculo disponíveis *online* em [79]. Os resultados são apresentados no quadro 5.7.

Quadro 5.7 – Valores das curvas NR e NC para as diferentes salas, considerando diferente velocidades de funcionamento dos equipamentos AVAC.

Sala	Banda de frequência condicionante posição máxima (Hz)	Valores obtidos com AVAC na posição máxima		Banda de frequência condicionante posição normal (Hz)	Valores obtidos com AVAC na posição normal		Valores máximos recomendados		ΔNR AVAC posição máxima	ΔNC AVAC posição máxima
		NR	NC		NR	NC	NR	NC		
B002	250	35	34	-	-	-	35	30	0	4
B018	1k	53	52	1k	42	43			18	22
B023	1k	42	41	500	40	39			7	11
B027	125	60	63	125	51	55			25	33
B032	1k	36	35	1k	28	26			1	5
B221	500	59	59	250	50	50			24	29
B333	500	59	59	500	46	46			24	29
B334	500	60	60	500	55	55			25	30

A comparação dos valores dos níveis de pressão sonora do ruído dos equipamentos AVAC com as curvas NR e NC apresentadas no quadro 5.7 permite concluir que quase todas as salas ultrapassam os valores máximos recomendados. Só a sala B002 respeita os valores da curva NR para o funcionamento do sistema AVAC na sua posição máxima, no entanto esta mesma sala não respeita a curva NC. O funcionamento normal dos equipamentos AVAC leva a que a sala B032 consiga cumprir os valores máximos recomendados para as curvas NR e NC. Analisando os valores de ΔNR e ΔNC para os equipamentos AVAC a funcionar na posição máxima é possível verificar que as salas do piso dois e três apresentam valores idênticos entre si permitindo assim concluir que estes equipamentos originam iguais curvas de incomodidade. Já as salas do piso zero por sua vez apresentam valores de ΔNR e ΔNC bastante divergentes entre si, demonstrando assim um comportamento bastante irregular dos equipamentos AVAC.

Através deste quadro é ainda possível verificar quais as frequências que condicionam a atribuição dos valores das curvas NR e NC para as diferentes salas. Verifica-se que a posição de funcionamento do sistema AVAC influencia a frequência condicionante para a obtenção de cada curva. O aumento da velocidade de funcionamento do equipamento AVAC para as salas B023 e B221 leva a que as frequências condicionantes passem de 500 para 1k Hz e de 250 para 500 Hz, respetivamente. Para as restantes salas as frequências condicionantes mantêm-se constantes independentemente da velocidade de funcionamento.

d) AI e SIL

Os valores relativos ao AI foram calculados em banda de oitava para o ruído sem o funcionamento dos equipamentos AVAC e em 1/3 de oitava para o funcionamento dos equipamentos AVAC. Os valores deste parâmetro são apresentados no quadro 5.8.

Quadro 5.8 – Valores de AI para as diferentes salas com e sem funcionamento dos equipamentos AVAC.

Sala	AI sem AVAC	AI com AVAC normal	AI com AVAC máximo	ΔAI =sem - normal	ΔAI = sem - máximo
B002	1,00		0,99*		0,01*
B018	1,00	0,94	0,65	0,06	0,35
B023	1,00	0,94	0,65	0,06	0,35
B027	1,00	0,89	0,60	0,10	0,40
B032	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
B221	1,00	0,94	0,67	0,06	0,33
B333	1,00	0,91	0,56	0,09	0,43
B334	1,00	0,62	0,39	0,37	0,61

*Só dispõe um regime de funcionamento

Através da comparação do quadro 5.8 com o quadro 2.8 é possível verificar que os valores de AI sem o funcionamento dos equipamentos AVAC em todas as salas apresentam o valor máximo possível para este parâmetro, o que corresponde a grau de inteligibilidade excelente para comunicação e a um grau de privacidade totalmente inexistente.

Com o funcionamento dos equipamentos AVAC na velocidade normal observam-se descidas deste parâmetro entre 0,06 a 0,10 para a quase totalidade das salas, continuando estas assim a apresentar o mesmo grau de inteligibilidade e de privacidade anteriormente referidos. As exceções são a B032 e B334. Na B032 verifica-se que não existe qualquer redução, enquanto a B334 (pior resultado) apresenta uma redução de 0,37 passando assim a apresentar um valor de 0,62 ao qual corresponde um grau de inteligibilidade bom e a um grau de privacidade quase inexistente.

Relativamente ao funcionamento dos equipamentos AVAC na velocidade máxima verifica-se a redução de apenas 0,01 para a sala B002 devido a esta ter um equipamento do tipo *ROOFTOP*, continuando assim a apresentar o mesmo grau de inteligibilidade e de privacidade. Já nas salas com equipamentos do tipo UTA's e sem tratamento acústico verificam-se descidas de 0,33 a 0,61. As salas B018, B023 e B221 apresentam reduções entre 0,33 e 0,35 o que permite com que estas continuem a apresentar o mesmo grau de inteligibilidade e de privacidade que apresentavam sem os equipamentos AVAC ligados. A B027 e a B333 devido a apresentarem reduções superiores a 0,35 e inferiores a 0,60, permite com que estas possam ser classificadas com um grau de inteligibilidade bom e um grau de privacidade quase inexistente. A B334 apresenta o pior resultado de todas as salas analisadas com um valor de 0,39, o qual corresponde a um grau de inteligibilidade sofrível e um grau de privacidade pobre. Por fim a sala B032 (com tratamento acústico) volta a não apresentar qualquer redução deste parâmetro relativamente à mesma análise sem equipamento AVAC.

Os valores relativos ao PSIL são apresentados no quadro 5.9 e dizem respeito ao nível de pressão sonora do ruído de fundo nas frequências de 500, 1k e 2k Hz.

Quadro 5.9 – Valores de PSIL para as diferentes salas com e sem funcionamento dos equipamentos AVAC.

Sala	Distância máxima existente entre orador e ouvinte (m)	Sem AVAC		AVAC normal		AVAC máximo		Δ PSIL (dB) =normal- sem	Δ PSIL (dB) =máx.- sem
		PSIL (dB)	Distância máxima possível para o sexo feminino (voz normal) (m)	PSIL (dB)	Distância máxima possível para o sexo feminino (voz normal) (m)	PSIL (dB)	Distância máxima possível para o sexo feminino (voz normal) (m)		
B002	13	32	12	*	*	33	12	*	1
B018	8	30	15	40	5	49	2	10	19
B023	12	30	15	37	7	41	4	7	11
B027	9	31	13	43	3	51	1	12	21
B032	10	23	32	32	12	34	10	8	11
B221	22	31	13	39	5	51	1	8	20
B333	6	33	11	42	4	54	1	9	21
B334	9	36	7	51	1	57	1	15	21

*Só dispõe um regime de funcionamento (máximo)

A primeira análise do PSIL, para as diferentes salas, foi realizada tendo em conta o esforço de voz normal (visto ser este o nível que deveria ser usado nas salas de aula) e a distância máxima existente entre o orador e o ouvinte. Assim através da comparação dos valores de PSIL obtidos nas diferentes salas de aula (quadro 5.9) com os valores máximos para os quais a comunicação da palavra é no limite possível (quadro 2.8), conclui-se que sem a presença do ruído proveniente dos equipamentos AVAC as salas B018, B023, B027, B032 e B333 apresentam valores de forma a ser possível a comunicação, independentemente do sexo em toda a sua extensão. Por sua vez, as salas B002, B221 e B334 apresentam-se acima do limite possível para o sexo feminino (de 1 a 4 dB), sendo no entanto cumprido para o sexo masculino.

Com o funcionamento dos equipamentos AVAC na posição normal verificam-se aumentos do PSIL de 7 a 15 dB ao longo das diversas salas de aula. Estes aumentos provocam alterações dos resultados anteriores. Devido a estas alterações as salas B018 e B023 não conseguem cumprir os valores limites relativos ao sexo feminino (acima do limite de 3 a 5 dB), ficando para o sexo masculino mesmo no limite. A B027 e a B333 ultrapassam o limite em 4 dB para o sexo masculino e feminino, respetivamente. A única sala que continua a apresentar valores que não ultrapassam o limite é a B032, ficando esta a 2 dB desse valor para o sexo feminino. A B221 necessitaria de um esforço de voz muito alto por parte de ambos os sexos para a palavra ser capaz de chegar dentro dos limites da comunicação em toda envolvente da sala. Já a B334 apresenta um valor tão elevado que seria necessário um esforço de voz muito alto por parte do sexo masculino, sendo que assim ficaria mesmo no limite.

Analisando por último os valores relativos ao funcionamento dos equipamentos AVAC na posição máxima verificam-se aumentos de PSIL de 11 a 21 dB para as salas com equipamentos do tipo UTA's e de 1 dB para a sala com o tipo *Rooftop*. Assim a única sala capaz de cumprir os valores limites do PSIL para um esforço de voz normal é a B032, ficando no entanto mesmo no limite para o sexo feminino. Para as restantes salas seria necessário aumentar o esforço de voz, pelo que na sala B334 só o sexo masculino conseguiria comunicar recorrendo ao esforço de voz máximo e na B221 nenhum dos sexos conseguiria comunicar.

Fazendo uma análise dos valores relativos às distâncias máximas possíveis de modo a ser exequível a comunicação da palavra com um esforço de voz normal para o sexo feminino (limitante) com as distâncias máximas existentes, é possível verificar que sem a presença de equipamentos AVAC existem reduções de 1 a 9 m, sendo que o caso mais crítico se verifica na B221 com a limitação da comunicação da palavra a 13 m, sendo que esta mede 22 m.

Com o funcionamento dos equipamentos AVAC na posição normal observam-se reduções de 3 a 16 m, apresentando a B221 a maior redução (17 m) e a B334 a menor distância para a comunicação da palavra (1 m)

Analisando por último os valores dos equipamentos AVAC no máximo é possível verificar reduções de 8 a 21 m. Apresentado a maioria das salas distâncias máximas de 1 m entre o orador e o ouvinte.

As salas B002 e B032 não apresentam reduções da distância entre orador e ouvinte independentemente dos equipamentos AVAC estarem ou não ligados, sendo que no entanto a B002 não consegue abranger a comunicação da palavra a toda a sua extensão por 1 m.

Para finalizar interessa destacar que todos os valores relativos ao mesmo nível de esforço de voz sofrem reduções de 5 dB na passagem do orador do sexo masculino para o sexo feminino e que o aumento de um nível de esforço de voz corresponde a um incremento de 6 dB para cada sexo.

5.3.3. RASTI

5.3.3.1. Metodologia

A metodologia de análise objetiva da inteligibilidade da palavra neste estudo, consistiu na utilização do método de RASTI para duas situações distintas: com sistema AVAC desligado e ligado. Este método conforme descrito no capítulo 2, baseia-se numa simplificação do método STI e permite relacionar os valores obtidos com a inteligibilidade da palavra segundo a norma CEI 60268-16 (CEI1988) [80].

A realização deste método requer a utilização de uma fonte sonora e de um recetor. Para tal, utilizou-se uma fonte sonora com o modelo 4225 (Figura 5.25) e um recetor com o modelo 4419 (Figura 5.26), ambos equipamentos da marca Brüel & Kjaer.

A fonte sonora foi colocada na posição normalmente ocupada pelo orador, conforme identificada na figura 5.27, a uma altura aproximada de 1,70 m do piso e direcionada para o fundo da sala. O recetor, por sua vez, foi colocado para as diversas posições ocupadas pelos alunos, estando situado a aproximadamente 1,20 m do piso, simulando a posição da cabeça dos alunos. O nível de pressão sonora de referência utilizado na fonte sonora foi o modo “Ref+10 dB”, correspondente a 69 dB e 60 dB para as frequências de 500 Hz e 2000 Hz, respetivamente. Por sua vez, o recetor mediu a receção do sinal durante 8 s.

As diversas posições ocupadas pelo recetor foram selecionadas de forma a que com estas fosse possível uma caracterização de toda a sala de aula, tendo em conta a distância e direção em relação à fonte sonora. Para tal, adotou-se a medição de apenas metade de cada uma das salas de aula, devido à simetria dos locais. Esta simetria permite que os valores em cada ponto de ensaio sejam semelhantes para a outra metade da sala. Os valores do RASTI com o sistema AVAC ligado são ligeiramente superiores para a outra metade da sala, devido as caixas de extração de ar estarem mais afastadas destes pontos. No entanto, devido a ser muito pequena a variação, assumiu-se a medição no lado mais desfavorável.

A velocidade de funcionamento do equipamento AVAC para a medição do RASTI foi escolhida de forma a que o ruído produzido por este, não fosse de tal forma exagerado que não permitisse o desenrolar das atividades escolares de ensino. O ruído produzido por estes equipamentos no seu funcionamento máximo é de tal forma intenso, que se torna quase doloroso estar sujeito a este. Como tal para as salas B018, B023, B032 foi escolhida uma velocidade de funcionamento normal, posição 2 (de 1 a 3 possíveis). Para a sala B002 devido a esta possuir equipamentos com apenas uma velocidade de funcionamento, a posição medição do RASTI foi essa. Enquanto para as salas B221, B333 e B334, foram escolhidas as posições de funcionamento médias-baixas, posição 3, por os mesmos motivos das salas B018, B023 e B032 (de 1 a 9 possíveis).

Escolheram-se assim seis pontos de ensaio, representados na figura 5.27. Três pontos relativos ao eixo de simetria e três pontos situados a sensivelmente metade do comprimento entre o eixo de simetria e a parede interior.



Figura 5.25 - Fonte sonora do RASTI, modelo 4225, marca Brüel & Kjaer
.[Foto autor]



Figura 5.26 – Recetor RASTI, modelo 4419, marca Brüel & Kjaer. [Foto do autor]

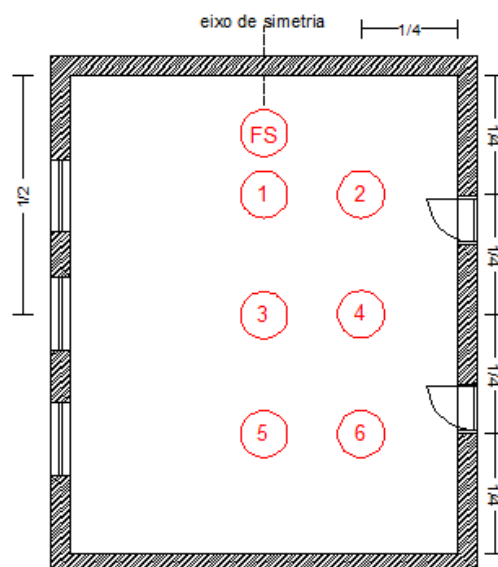


Figura 5.27 – Localização tipo da fonte sonora (FS) e dos pontos de medição do RASTI (1 a 6) em cada sala.

5.3.3.2. Resultados

Os valores do RASTI medidos em cada posição da sala de aula com o sistema AVAC ligado e desligado são os apresentados nos quadros 5.10 a 5.17. Nestes quadros são referidas as datas e horas de medição de cada sala de aula, devido ao ruído proveniente dos corredores adjacentes às salas de aula poder interferir nos valores medidos. As horas de maior movimentação, durante a realização dos ensaios, nos corredores, estiveram normalmente compreendidas entre as 15 e as 18 h.

Na medição do RASTI foram realizadas no mínimo três leituras para cada posição e calculado posteriormente a média aritmética. Com estes valores médios de cada posição e realizando a média aritméticas destes, foi então possível obter o índice de RASTI médio para cada sala de aula.

No final de cada quadro, relativo a cada sala, é apresentado um gráfico relativo aos pontos correspondentes ao eixo de simetria e outro relativo a 1/4 deste mesmo eixo (Figura 5.28 a Figura 5.43) ilustrativo da comparação dos valores do RASTI com AVAC desligado e ligado, de modo a facilitar a interpretação do leitor da variação do RASTI ao longo das salas de aula.

Quadro 5.10 –Valores de RASTI sem e com AVAC na sala B002.

RASTI										24/04/2013 e 19/04/2013
Sala: B002										17:10 / 19:10 h
Pontos	Medições								RASTI médio	
	1ª		2ª		3ª		4ª		Sem AVAC	Com AVAC
	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC		
1	0,47	0,44	0,46	0,45	0,46	0,46	0,46	0,43	0,46	0,45
2	0,42	0,41	0,41	0,42	0,42	0,42	0,42	0,41	0,42	0,42
3	0,40	0,36	0,41	0,38	0,39	0,39	-	0,38	0,40	0,38
4	0,38	0,37	0,37	0,37	0,39	0,35	0,40	0,38	0,39	0,37
5	0,38	0,36	0,36	0,36	0,39	0,37	0,38	0,37	0,38	0,37
6	0,39	0,40	0,40	0,38	0,38	0,39	0,39	0,38	0,39	0,39
RASTI médio na sala:									0,41	0,39

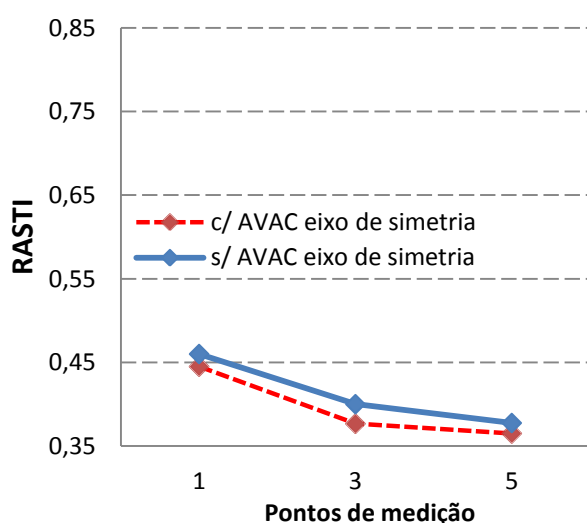


Figura 5.28 – Valores de RASTI no eixo de simetria da sala B002.

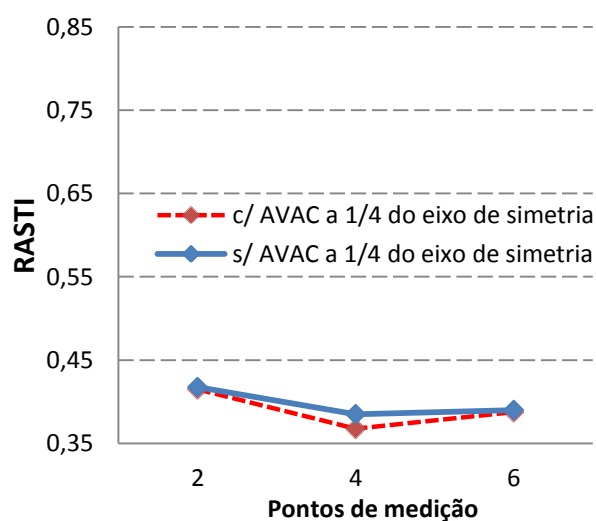


Figura 5.29 – Valores de RASTI a 1/4 do eixo de simetria da sala B002.

Quadro 5.11 – Medição dos valores de RASTI sem e com AVAC (na posição 2) na sala 018.

RASTI							18/04/2013 e 25/04/2013			
Sala: B018		18/04/2013 / 25/04/2013							20:50 / 17:10 h	
Pontos	Medições								RASTI médio	
	1ª		2ª		3ª		4ª			
	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC
1	0,50	0,49	0,50	0,48	0,49	0,50	-	-	0,50	0,49
2	0,49	0,48	0,51	0,49	0,51	0,49	-	-	0,50	0,49
3	0,49	0,47	0,49	0,47	0,49	0,48	-	-	0,49	0,47
4	0,49	0,49	0,48	0,47	0,50	0,49	-	0,48	0,49	0,48
5	0,49	0,48	0,50	0,48	0,49	0,48	-	-	0,49	0,48
6	0,49	0,49	0,51	0,49	0,50	0,49	-	-	0,50	0,49
RASTI médio na sala:									0,50	0,48

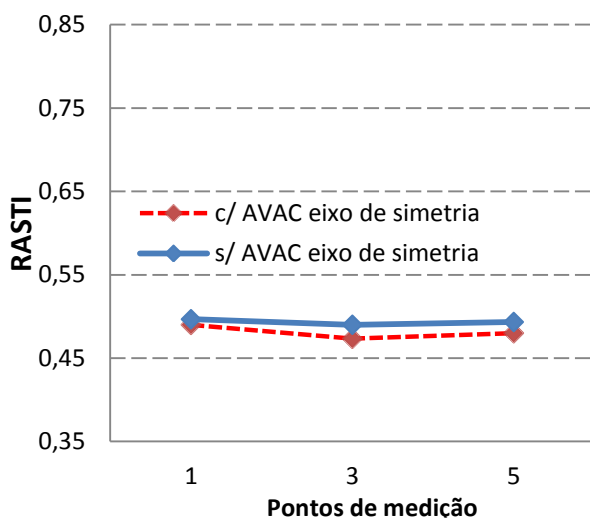


Figura 5.30 – Valores de RASTI no eixo de simetria da sala B018.

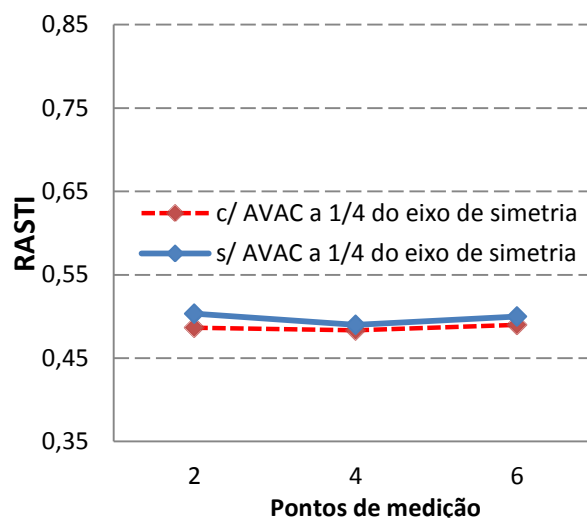


Figura 5.31 – Valores de RASTI a 1/4 do eixo de simetria da sala B018.

Quadro 5.12 – Medição dos valores de RASTI sem e com AVAC (na posição 2) na sala B023.

RASTI										18/04/2013 e 25/04/2013
Sala: B023										19:55 / 17:40 h
Pontos	Medições								RASTI médio	
	1 ^a		2 ^a		3 ^a		4 ^a		Sem AVAC	Com AVAC
	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC		
1	0,50	0,49	0,52	0,49	0,51	0,50	-	-	0,51	0,49
2	0,47	0,47	0,47	0,46	0,45	0,47	-	0,45	0,46	0,46
3	0,45	0,44	0,45	0,44	0,44	0,43	-	-	0,45	0,44
4	0,44	0,43	0,45	0,44	0,44	0,43	-	-	0,44	0,43
5	0,42	0,41	0,42	0,41	0,40	0,41	-	-	0,41	0,41
6	0,44	0,43	0,44	0,42	0,44	0,42	-	-	0,44	0,42
RASTI médio na sala:									0,45	0,44

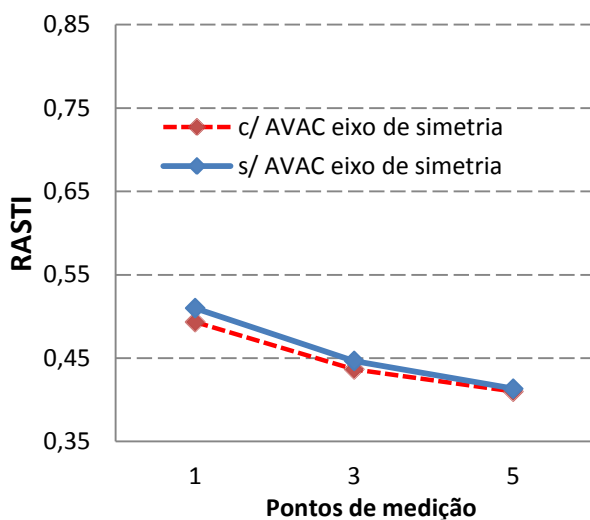


Figura 5.32 – Valores de RASTI no eixo de simetria da sala B023.

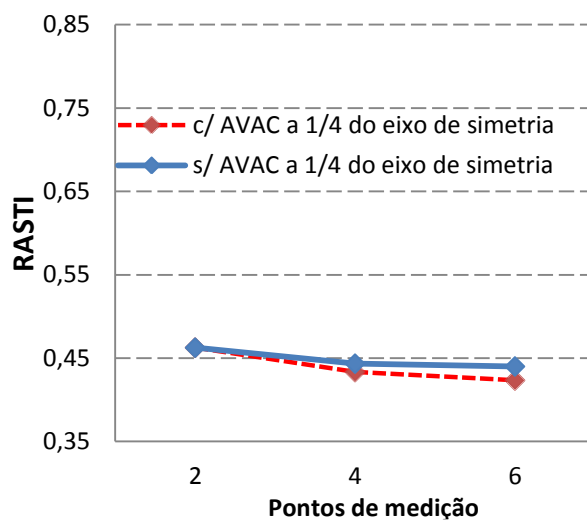


Figura 5.33 – Valores de RASTI a 1/4 do eixo de simetria da sala B023.

Quadro 5.13 – Medição dos valores de RASTI sem e com AVAC (na posição 2) na sala B027.

RASTI							19/04/2013 e 25/04/2013			
Sala: B027							18:20 / 18:15 h			
Pontos	Medições								RASTI médio	
	1ª		2ª		3ª		4ª			
	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC
1	0,57	0,52	0,56	0,54	0,56	0,53	-	-	0,56	0,53
2	0,48	0,47	0,49	0,47	0,51	0,48	-	-	0,49	0,47
3	0,49	0,50	0,50	0,50	0,50	0,47	-	0,47	0,50	0,49
4	0,49	0,48	0,49	0,49	0,48	0,49	-	-	0,49	0,49
5	0,46	0,45	0,46	0,44	0,46	0,44	0,47	-	0,46	0,44
6	0,48	0,47	0,49	0,48	0,48	0,48	0,49	-	0,49	0,48
RASTI médio na sala:									0,50	0,48

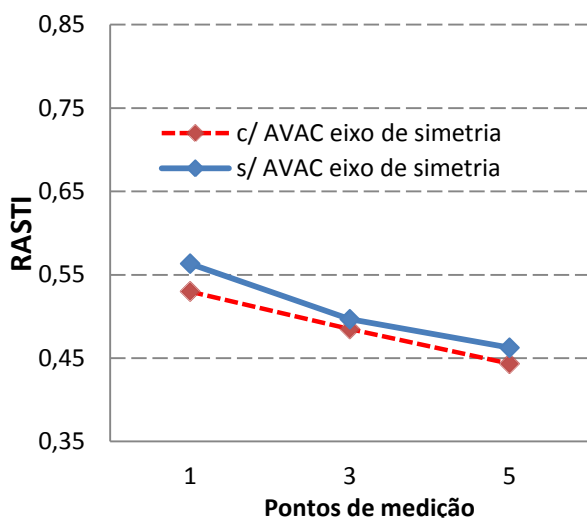


Figura 5.34 – Valores de RASTI no eixo de simetria da sala B027.

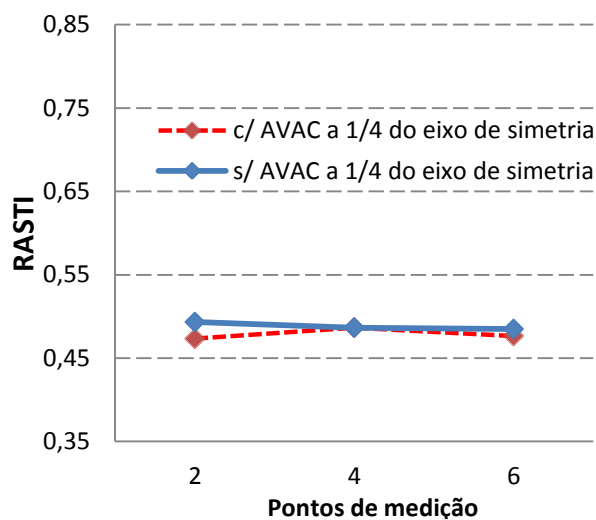


Figura 5.35 – Valores do RASTI a 1/4 do eixo de simetria da sala B027.

Quadro 5.14 – Medição dos valores de RASTI sem e com AVAC (na posição 2) na sala B032.

RASTI									19/04/2013 e 26/04/2013	
Sala: B032									15:55/ 16:15 h	
Pontos	Medições								RASTI médio	
	1ª		2ª		3ª		4ª			
	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC
1	0,83	0,80	0,83	0,80	0,83	0,80	-	0,81	0,83	0,80
2	0,77	0,77	0,77	0,76	0,79	0,76	-	0,79	0,78	0,77
3	0,76	0,77	0,76	0,77	0,78	0,75	-	0,77	0,77	0,77
4	0,76	0,76	0,76	0,76	0,77	0,74	-	0,77	0,76	0,76
5	0,73	0,72	0,74	0,74	0,74	0,74	0,76	0,74	0,74	0,74
6	0,78	0,73	0,75	0,76	0,77	0,76	0,77	0,71	0,77	0,74
RASTI médio na sala:									0,77	0,76

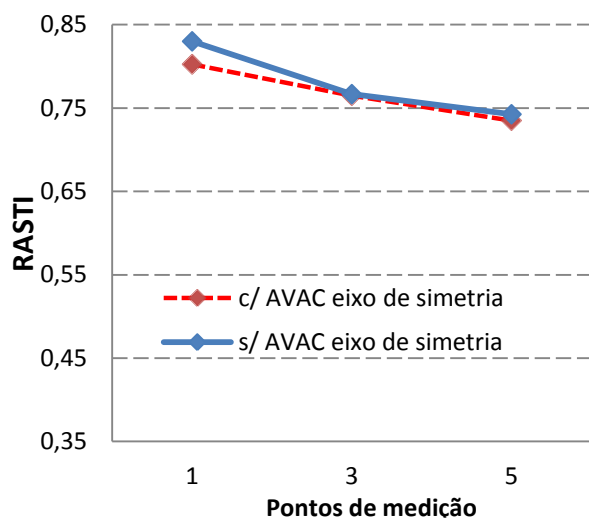


Figura 5.36 – Valores de RASTI no eixo de simetria da sala B032.

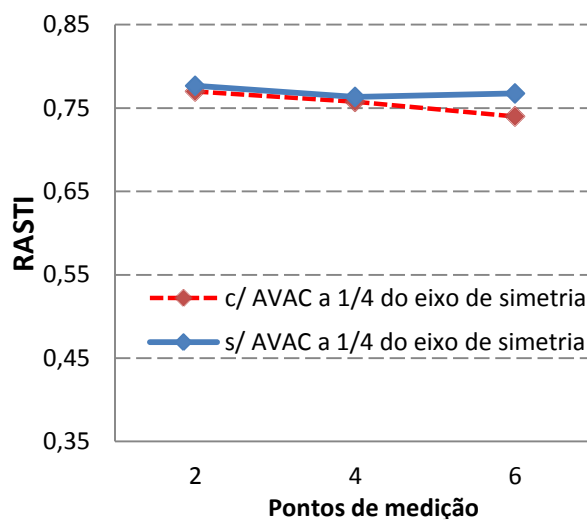


Figura 5.37 – Valores de RASTI a 1/4 do eixo de simetria da sala B032.

Quadro 5.15 – Medição dos valores de RASTI sem e com AVAC (na posição 3) na sala B221.

RASTI										18/04/2013 e 26/04/2013
Sala: B221										17:30/ 21:30 h
Pontos	Medições								RASTI médio	
	1ª		2ª		3ª		4ª		Sem AVAC	Com AVAC
	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC		
1	0,55	0,56	0,55	0,55	0,56	0,54	-	-	0,55	0,55
2	0,53	0,51	0,51	0,53	0,52	0,50	-	-	0,52	0,51
3	0,46	0,47	0,48	0,45	0,47	0,46	-	-	0,47	0,46
4	0,46	0,46	0,46	0,46	0,48	0,46	-	-	0,47	0,46
5	0,45	0,43	0,46	0,44	0,44	0,43	-	-	0,45	0,43
6	0,44	0,41	0,43	0,43	0,42	0,44	-	0,43	0,43	0,43
RASTI médio na sala:									0,48	0,47

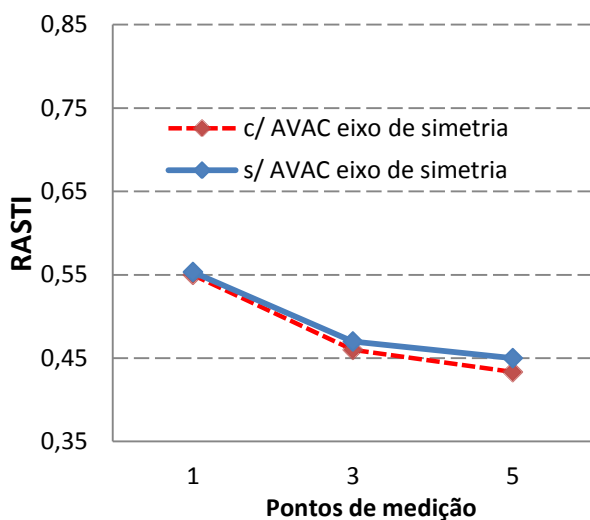


Figura 5.38 – Valores de RASTI no eixo de simetria da sala B221.

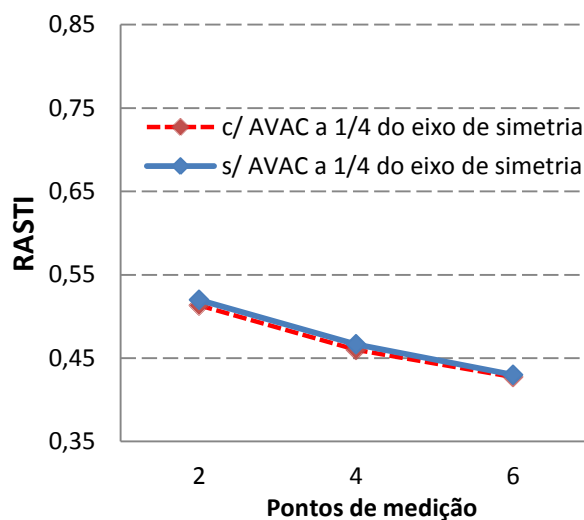


Figura 5.39 – Valores de RASTI a 1/4 do eixo de simetria da sala B221.

Quadro 5.16 – Medição dos valores de RASTI sem e com AVAC (na posição 3) na sala B333.

RASTI		18/04/2013 e 26/04/2013								
Sala: B333		16:15 / 20:30 h								
Pontos	Medições								RASTI médio	
	1 ^a		2 ^a		3 ^a		4 ^a			
	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC
1	0,56	0,56	0,57	0,57	0,56	0,55	-	-	0,56	0,56
2	0,52	0,49	0,52	0,52	0,51	0,48	-	0,48	0,52	0,49
3	0,49	0,49	0,49	0,47	0,48	0,50	-	0,47	0,49	0,48
4	0,47	0,46	0,49	0,46	0,47	0,45	0,47	0,47	0,48	0,46
5	0,47	0,48	0,47	0,49	0,49	0,47	-	0,48	0,48	0,48
6	0,46	0,45	0,48	0,46	0,48	0,47	-	0,47	0,47	0,46
RASTI médio na sala:									0,50	0,49

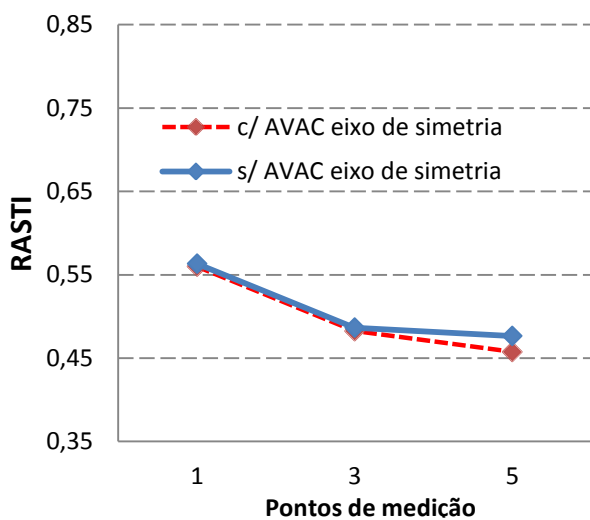


Figura 5.40 – Valores de RASTI no eixo de simetria da sala B333.

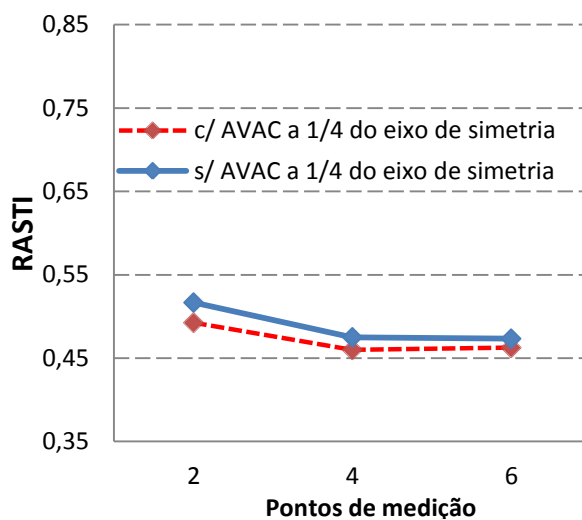


Figura 5.41 – Valores de RASTI a 1/4 do eixo de simetria da sala B333.

Quadro 5.17 – Medição dos valores de RASTI sem AVAC e com AVAC (na posição 3) na sala B334.

Sala: B334		RASTI								18/04/2013 e 26/04/2013	
										17:00 / 22:00 h	
		Medições								RASTI médio	
Pontos		1 ^a		2 ^a		3 ^a		4 ^a			
		Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC
1		0,58	0,54	0,59	0,53	0,58	0,54	-	0,53	0,58	0,54
2		0,50	0,51	0,52	0,52	0,52	0,50	-	0,52	0,51	0,51
3		0,52	0,47	0,51	0,47	0,50	0,48	-	0,48	0,51	0,48
4		0,48	0,46	0,48	0,48	0,48	0,46	-	0,47	0,48	0,47
5		0,47	0,44	0,46	0,45	0,48	0,44	-	0,44	0,47	0,44
6		0,45	0,46	0,45	0,48	0,45	0,47	-	0,46	0,46	0,45
RASTI médio na sala:										0,50	0,48

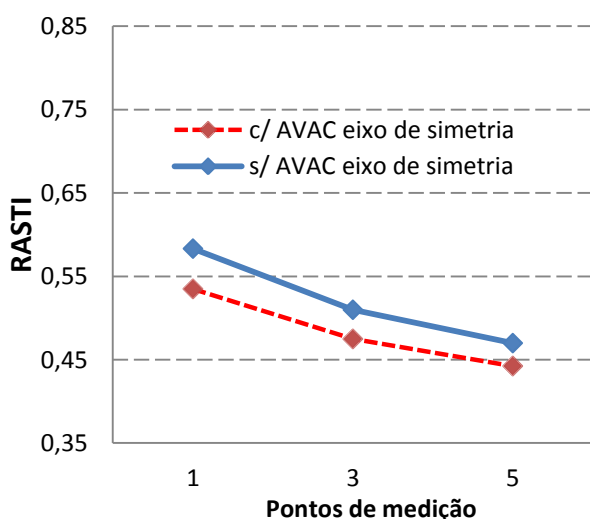


Figura 5.42 – Valores de RASTI no eixo de simetria da sala B334.

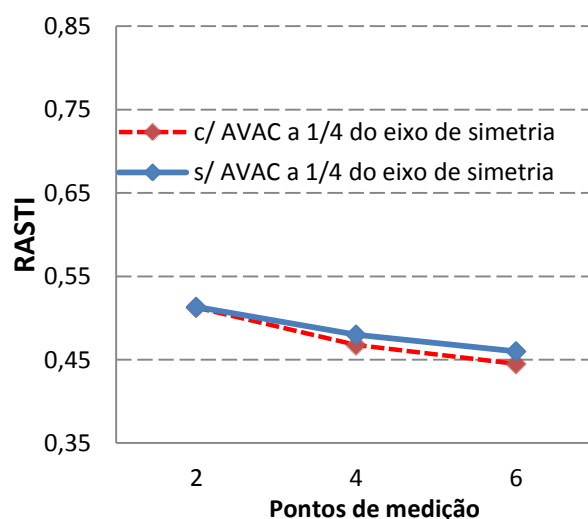


Figura 5.43 – Valores de RASTI a 1/4 do eixo de simetria da sala B334.

As salas em geral apresentam uma diminuição do valor de RASTI, independentemente do sistema AVAC estar ou não ligado, para as diversas posições de medição com o aumento da distância ao emissor. Este fato é agravado para as posições a 1/4 do eixo de simetria pela direccionalidade. Por estes motivos, tal como seria de esperar os pontos no eixo de simetria apresentam valores superiores. Existem no entanto pontos em que o RASTI é superior na zona a 1/4 do eixo de simetria relativamente a este eixo, o que poderá ser justificado pelas reflexões das ondas não só no teto, mas também nas

paredes. Este fato encontra-se evidenciado para salas em que o pé-direito vai diminuindo com o aumento da distância ao emissor (caso dos anfiteatros).

A comparação dos valores médios de RASTI com a classificação normalizada presente no quadro 2.7 (Capítulo 2), para as diversas salas estudadas é apresentada no quadro 5.18.

Pelo quadro 5.18 conclui-se que a totalidade das salas apresentam graus de inteligibilidade da palavra inferiores a Bom. Exceto a sala B032 devido a possuir tratamento acústico. Esta sala apresenta valores de RASTI de 0,77 e 0,76, consoante o equipamento AVAC esteja desligado ou ligado ou seja, de 0,27 a 0,36 melhor (num máximo possível de 1) do que as salas sem tratamento acústico. A sala que por sua vez apresenta os piores resultados é a sala B002, com valores de RASTI de 0,41 e 0,39, respetivamente. Tal poderá ser explicado devido ao elevado volume que o local possui comparativamente com as outras salas. O elevado pé-direito da sala faz com que as ondas sonoras que chegam aos recetores se devam sobretudo a caminhos indiretos.

As salas B018, B027, B333 e B334 apresentam entre si valores de RASTI quase idênticos consoante o sistema AVAC esteja em funcionamento ou não. Os valores de RASTI sem AVAC são em todas as salas de 0,50 sendo que com AVAC diminuem para 0,48, exceto na B333 que diminui para 0,49. O fato de apresentar valores idênticos poderá ser explicado devido aos volumes destas salas de aula não variarem muito entre si (mínimo=134 m³ e máximo=192 m³).

Por último, as salas B023 e B221 apresentam valores de RASTI sem AVAC de 0,45 e 0,48, e valores com AVAC de 0,44 e 0,47, respetivamente. Apesar da sala B221 possuir um volume superior à sala B023, os valores de RASTI da sala B221 são superiores. Este fato apesar de aparência anormal, poderá ser justificado devido ao pé-direito da sala B221 ser mais baixo e constante. Devido a esta circunstância as reflexões sucessivas no teto fazem aumentar o sinal no recetor.

O quadro 5.18 faz um resumo dos valores médios de RASTI obtidos nas salas e apresenta a classificação da cada sala de aula relativamente ao grau de inteligibilidade.

Quadro 5.18 – Classificação das salas de aula quanto ao grau de inteligibilidade para sistema AVAC ligado e desligado.

Sala	RASTI médio sem AVAC	Grau de inteligibilidade	RASTI médio com AVAC	Grau de inteligibilidade	Δ_{RASTI} (=sem – com)	Δ_{RASTI} p/B032	
						Sem AVAC	Com AVAC
B002	0,41	Fraca	0,39*	Fraca	0,02	0,36	0,37
B018	0,50	Razoável	0,48**	Razoável	0,02	0,27	0,28
B023	0,45	Razoável	0,44**	Fraca	0,01	0,32	0,32
B027	0,50	Razoável	0,48**	Razoável	0,02	0,27	0,28
B032	0,77	Excelente	0,76**	Excelente	0,01	-	-
B221	0,48	Razoável	0,47***	Razoável	0,01	0,29	0,29
B333	0,50	Razoável	0,49***	Razoável	0,01	0,27	0,27
B334	0,50	Razoável	0,48***	Razoável	0,02	0,27	0,28

* na posição 1; ** na posição 2 (de 1 a 3); *** na posição 3 (de 1 a 9)

Pelo quadro 5.18 pode ainda constatar-se que a entrada em funcionamento do sistema AVAC na posição máxima na sala B002 e na posição normal (2 numa escala de 1 a 3 e 3 de 1 a 9) para as restantes salas provoca uma redução ligeira dos valores médios do RASTI. Esta redução de RASTI entre 0,01 e 0,02 significa que o funcionamento do sistema AVAC na posição normal, não afeta de forma significativa a inteligibilidade da palavra média nestes locais. As posições escolhidas (quase as mínimas) indicam que as outras são demasiado ruidosas para sequer tentar ligar os equipamentos numa velocidade maior enquanto as aulas decorrem.

Pode-se assim concluir que o sistema AVAC na posição normal de funcionamento não acarreta grandes prejuízos no que toca à inteligibilidade da palavra. No entanto o que não se avaliou, foi se estas posições de funcionamento dos sistemas AVAC eram adequadas a uma correta ventilação.

Da comparação das diversas salas com B032 verifica-se que estas de grosso modo apresentam uma variação de RASTI na ordem dos 0,30 (num máximo possível de 1) considerando-se o sistema AVAC desligado ou ligado.

5.3.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

5.3.4.1. Metodologia

A medição do tempo de reverberação requer a utilização de uma fonte sonora emissora de um ruído branco capaz de varrer todo o espectro de frequências de interesse com energia suficiente de modo a assegurar decaimentos superiores ao ruído de fundo. Por sua vez, o recetor regista o tempo de decaimento do nível de pressão sonora para valores de 20 ou 30 dB e converte-os através de uma extrapolação para um decaimento de 60 dB (o valor fornecido pelo equipamento). Os equipamentos utilizados na realização deste ensaio foram uma fonte sonora *B&K* modelo 4224 (Figura 5.44) e um recetor (sonómetro) *B&K* modelo 2260 (Figura 5.45) posicionado a uma altura de aproximadamente 1,25. O tempo de emissão do ruído foi de aproximadamente 2 a 3 s, sendo o registo do nível de pressão sonora realizado de forma instantânea pelo sonómetro. Os valores foram medidos nas bandas de oitava entre os 63 e os 8.000 Hz seguindo as recomendações da norma NP EN ISO 3382 [81].

O ensaio foi realizado para metade do espaço, visto as salas de aula apresentarem características simétricas e assim os valores medidos serem válidos para a outra metade. Como tal, para caracterizar as salas foram escolhidos três pontos, tal como se encontra representado na figura 5.46. A medição do tempo de reverberação em cada ponto foi realizada para duas direções, correspondentes a um ângulo de 30° a 40° com o eixo da sala. Os valores correspondentes às duas direções são calculados automaticamente pelo sonómetro como uma média aritmética e este fornece assim um único valor para cada ponto.



Figura 5.44 – Fonte sonora, modelo 4224, marca Brüel & Kjær. [Foto do autor]



Figura 5.45 – Recetor sonoro, modelo 2260, marca Brüel & Kjær. [Foto do autor]

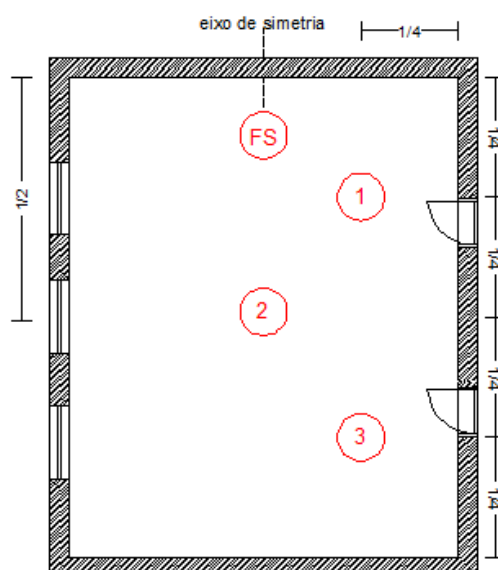


Figura 5.46 – Localização tipo da fonte sonora (FS) e dos pontos de medição (1 a 3) do tempo de reverberação em cada sala.

5.3.4.2. Tempo de Reverberação Ótimo

O tempo de reverberação está profundamente relacionado com as condições geométricas e absorventes dos locais [3]. Tal como descrito no capítulo 2, locais como salas de aula requerem baixos tempos de reverberação, enquanto que igrejas ou salas de concerto requerem tempos de reverberação mais elevados.

Devido a este fato vários autores apresentaram propostas para o tempo de reverberação ótimo em função do tipo de atividade que se desenvolve no local. De seguida são apresentadas algumas destas propostas.

Stephens e Bate em 1950 propuseram a expressão 5.1:

$$T_{optimo}_{[500,1k\text{ Hz}]} = K \times [0,00118 \times V^{1/3} + 0,1070] \quad (5.1)$$

Em que:

V – Volume (m³);

K – 4 para a palavra; 4,5 para a ópera; 5 orquestras; 6 para coros.

Através desta equação chega-se a valores do tempo de reverberação ótimo nas frequências de 500 e 1k Hz compreendidos entre 0,45 e 0,47 s para volumes de 134 e 607 m³, respetivamente.

Hodgson e Nosal em 2002 demonstraram que o tempo de reverberação ótimo nas frequências de 500 e 1k Hz de uma sala de aula ocupada está dependente do ruído de fundo (Quadro 5.17).

Quadro 5.19 - Valores do tempo de reverberação ótimo nas frequências de 500 e 1k Hz para salas de aula ocupadas em função do tipo de ruído ambiente [82].

Tempo de reverberação ótimo (s)	Ruído ambiente
0,7 – 0,9	Reduzido
0,4 – 0,5	Moderado
0,2 – 0,1	Elevado

Estes autores propuseram ainda a expressão 5.2 para o tempo de reverberação ótimo nas frequências de 500 e 1k Hz de uma sala de aula vazia:

$$\frac{1}{TR_{vazia}} = \left[\frac{1}{TR_{ocupado}} - \frac{A_p \times N}{0,161V} \right] \quad (5.2)$$

Em que:

TR_{vazia} – Tempo de reverberação ótimo da sala vazia (s);

TR_{ocupado} – Tempo de reverberação ótimo da sala ocupada (s);

A_p – Absorção sonora de cada ocupante, (neste caso A_p=0,44 m²);

V – Volume (m³);

N – Número de ocupantes [82].

Na utilização desta expressão considerou-se que as salas do piso zero devido a estarem presentes a ruídos de maiores intensidades um valor do TR ótimo ocupado de 0,4 s, enquanto que nas restantes salas dos pisos superiores se considerou um TR ótimo ocupado de 0,5 s. Estas considerações levaram a valores do tempo de reverberação ótimo das salas vazias entre 0,6 a 0,7 s.

Outras fontes, como os autores [83], [84], [85] propuseram valores do tempo de reverberação ótimo nas frequências de 500 e 1 k Hz entre 0,4 a 0,6; 0,4 a 0,5 e 0,5 a 0,8 s, respetivamente.

Devido ao tempo de reverberação ótimo variar consoante o autor, adotou-se neste estudo assumir um intervalo que contivesse os valores propostos pelos anteriores autores independentemente do volume da sala. Assim conclui-se que o tempo de reverberação ótimo nas frequências de 500 e 1k Hz para uma sala de aula deve estar entre 0,4 a 0,8 s.

5.3.4.3. Resultados

Os valores medidos dos tempos de reverberação são apresentados no quadro 5.20 e figura 5.47 para as diferentes salas de aula. Os valores apresentados dizem respeito ao parâmetro TR30, o qual é fornecido automaticamente pelo sonómetro, e tratados de forma a ser possível apresenta-los nas bandas de frequências dos 125 aos 4 kHz.

Os valores obtidos nos ensaios podem ser comparados com os valores recomendados para o tempo de reverberação ótimo nas frequências de 500 Hz e 1k Hz apresentados anteriormente.

Quadro 5.20 – Valores do tempo de reverberação nas diferentes salas de aula.

Sala	Ponto de medição	Freq. (Hz)						TR (s)	
		125	250	500	1k	2k	4k	[500, 1 k Hz]	[500, 1k, 2k Hz]
B002	1	2,7	3,4	3,3	2,8	2,7	2,2	3,1	2,9
	2	2,5	3,3	3,4	2,9	2,7	2,3	3,2	3,0
	3	3,4	3,5	3,4	2,9	2,7	2,2	3,2	3,0
	TR _{médio}	2,9	3,4	3,4	2,9	2,7	2,2	3,2	3,0
B018	1	1,9	1,8	1,7	1,7	1,6	1,5	1,7	1,7
	2	2,2	1,9	1,8	1,7	1,7	1,4	1,8	1,7
	3	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,5	1,8	1,8
	TR _{médio}	2,0	1,8	1,8	1,7	1,7	1,5	1,8	1,7
B023	1	2,5	2,6	2,4	2,3	2,2	2,0	2,4	2,3
	2	2,5	2,6	2,4	2,3	2,2	2,0	2,4	2,3
	3	2,5	2,6	2,4	2,2	2,2	2,0	2,3	2,3
	TR _{médio}	2,5	2,6	2,4	2,3	2,2	2,0	2,4	2,3
B027	1	2,1	1,8	1,7	1,7	1,6	1,4	1,7	1,7
	2	1,8	1,7	1,7	1,6	1,7	1,4	1,7	1,7
	3	2,0	1,7	1,7	1,6	1,7	1,4	1,7	1,7
	TR _{médio}	2,0	1,7	1,7	1,7	1,6	1,4	1,7	1,7

Quadro 5.20 – Valores do tempo de reverberação nas diferentes salas de aula (continuação).

Sala	Ponto de medição	Freq. (Hz)						TR (s)	
		125	250	500	1k	2k	4k	[500, 1 k Hz]	[500, 1k, 2k Hz]
B 032	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,7	0,6
	2	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5	0,7	0,6
	3	1,0	0,9	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6
	TR _{médio}	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5	0,7	0,6
B221	1	2,9	2,6	2,5	2,0	2,0	1,7	2,3	2,2
	2	2,8	2,7	2,5	2,0	2,0	1,8	2,3	2,2
	3	3,2	2,7	2,4	2,1	2,0	1,8	2,3	2,2
	TR _{médio}	2,9	2,7	2,5	2,0	2,0	1,7	2,3	2,2
B333	1	2,2	2,0	2,0	1,8	1,8	1,6	1,9	1,9
	2	2,1	1,8	2,0	1,7	1,7	1,5	1,9	1,8
	3	2,1	1,9	1,9	1,7	1,8	1,5	1,8	1,8
	TR _{médio}	2,1	1,9	1,9	1,7	1,7	1,5	1,8	1,8
B334	1	1,9	2,0	1,9	1,7	1,7	1,4	1,8	1,8
	2	1,9	2,0	2,0	1,8	1,8	1,5	1,9	1,9
	3	2,1	2,2	2,1	1,9	1,8	1,5	2,0	1,9
	TR _{médio}	2,0	2,0	2,0	1,8	1,7	1,5	1,9	1,8

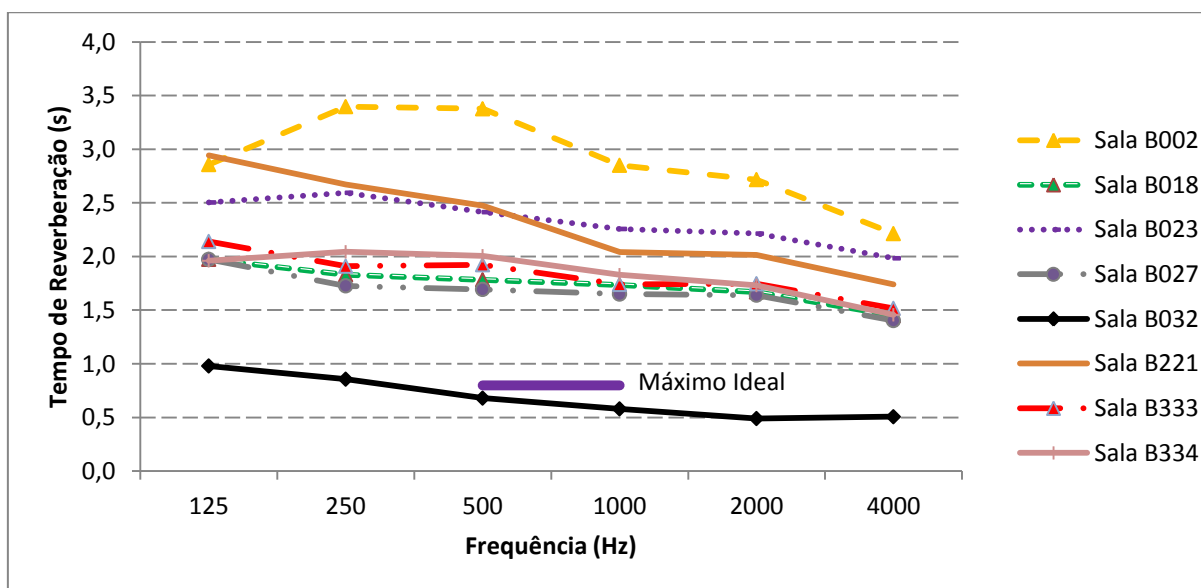


Figura 5.47 – Valores do tempo de reverberação médio para cada frequência em cada sala de aula (e valor máximo ideal de 0,8 s).

Através da análise do quadro 5.20 verifica-se que de todas as salas analisadas, apenas a B032 apresenta um tempo de reverberação, nas frequências centradas em 500 e 1k Hz, dentro do intervalo recomendado para uma boa percepção da palavra. Está sala apresenta um valor médio do $TR_{[500, 1k\text{ Hz}]}$ de 0,7 s, o qual fica abaixo do limite máximo de 0,8 s proposto.

Da análise realizada às restantes salas é possível concluir que estas se situam bastante acima do valor máximo recomendado devido a não possuírem qualquer tipo de tratamento acústico. A B002 toma um valor quase quatro vezes superior ao recomendado (mais 2,4 s), apresentando um valor do $TR_{[500, 1k\text{ Hz}]}$ de 3,2 s. Este valor deve-se essencialmente ao elevado volume (cerca de 607 m³).

A figura 5.47 apresenta as curvas do tempo de reverberação para as frequências de 125 Hz a 4kHz. Através da sua análise fica notória a presença de elevados tempos de reverberação nas baixas frequências. O que se deverá provavelmente ao tipo materiais bastantes refletores na sua constituição.

As salas B018, B023 e B027, por sua vez apresentam valores do $TR_{[500, 1k\text{ Hz}]}$ de 1,8, 2,4 e 1,7 s, respetivamente. Estas salas apresentam valores superiores aos recomendados em cerca de duas vezes para a B018 e B027 e quase três vezes superiores para a B023. A B018 e B027 apresentam valores quase iguais, devido ao formato e volume das salas quase não variarem. A diferença de volumes entre elas é de cerca de 4 m³, sendo o valor do menor volume de 169 m³. Por sua vez a B023 apesar de apresentar o mesmo tipo de formato, apresenta um volume aproximado de 349 m³, superior quase duas vezes às anteriores salas. Este fato contribui para o aumento do $TR_{[500, 1k\text{ Hz}]}$ em relação às anteriores salas em 0,7 e 0,8 s, respetivamente. As curvas do tempo de reverberação destas salas, demonstram que o TR tende a diminuir consoante o aumento das frequências. Este fato pode ser explicado devido às altas frequências serem mais absorvidas pelo ar.

As salas B221, B333 e B334 apresentam valores do $TR_{[500, 1k\text{ Hz}]}$ de 1,8 a 2,3 s o que corresponde a valores superiores aos recomendados em cerca de 2,5 vezes (mais 1,0 a 1,5 s). O aumento do $TR_{[500, 1k\text{ Hz}]}$ verificado das salas B333 e B334 para a B221 deve-se tal como nas salas anteriores, ao aumento do volume. O aumento de volume verificado das salas com menor $TR_{[500, 1k\text{ Hz}]}$ para a sala com maior $TR_{[500, 1k\text{ Hz}]}$ corresponde respetivamente a 3,5 e 2,4 vezes, apresentado assim a B221 um volume de 456 m³. As curvas do tempo de reverberação para todas as salas apresentam redução dos valores com o aumento da frequência, à exceção da B334 que apresenta um aumento do TR ao passar da frequência de 125 para 250 Hz.

Após esta análise, torna-se mais uma vez evidente que a sala B032 apresenta os melhores resultados, sendo a única que apresenta valores adequados para a função de sala de aula.

6

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo compara-se o comportamento acústico das salas da FEUP perante a legislação portuguesa em vigor, sendo que à data da construção da FEUP este regulamento ainda não estava em vigor e com as salas de aula da Escola Secundária Rodrigues de Freitas (Porto), recentemente remodelada [86].

Os valores relativos à legislação portuguesa (RRAE), podem ser consultados no capítulo 5, enquanto que os valores relativos às salas de aula da Escola Secundária Rodrigues de Freitas foram extraídos da dissertação de mestrado “Caracterização acústica interior de edifícios escolares reabilitados – O caso da Escola Secundária Rodrigues de Freitas, Porto” de Maria Menezes [86]. Devido ao fato de nesta escola se apresentarem características geométricas e resultados dos ensaios muito semelhantes, a sua comparação com o presente estudo, foi realizada com base na média dos valores das quatro salas de aula aí presentes.

6.2. COMPARAÇÃO DE VALORES OBTIDOS COM VALORES REGULAMENTARES NACIONAIS

6.2.1. RUÍDO DE FUNDO

O ruído de fundo de um local deverá apresentar valores de modo a não interfiram com as atividades para o qual foi projetado. O RRAE limita os valores máximos de ruído que os equipamentos coletivos em edifícios (Nível de avaliação padronizado - $L_{Ar,nT}$) podem produzir em função do seu funcionamento ser contínuo ou intermitente. Este parâmetro deve ser analisado de acordo com a norma NP EN ISO 10632 [87]. A obtenção deste parâmetro é de ordem experimental e define-se pela equação 4.1 (capítulo 4).

Devido a não se verificar em nenhuma das salas, características tonais do ruído, o valor de K_{tonal} nos cálculos realizados foi de 0 dB(A).

Os valores calculados para o $L_{Ar,nT}$ são apresentados nos quadros 6.1 e 6.2 para as situações de funcionamento normal e máximo dos equipamentos AVAC, respetivamente na gama de frequências de bandas de oitava entre 63 e 8k Hz. O quadro 6.3 apresenta os valores de $L_{Ar,nT}$ e de $L_{Ar,nT} + I$ para verificação deste com o RRAE.

Quadro 6.1 – Níveis de avaliação corrigidos do ruído particular de equipamentos nas salas com equipamentos AVAC a funcionar em velocidades normais.

	Sala	Frequência (Hz)								$L_{Ar,nT}$ (dB)
		63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
$L_{Ar,nT,i}$ (dB) Vel. normal	B002*	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B018	20,8	28,1	32,9	36,2	36,8	29,2	25,8	18,0	41,1
	B023	20,3	28,9	27,9	34,1	31,2	24,8	17,5	8,1	37,6
	B027	31,3	45,6	39,2	38,5	39,6	31,9	21,3	14,9	48,1
	B032	13,9	22,2	23,5	26,1	27,0	20,8	14,9	11,5	31,7
	B221	13,4	31,4	42,7	35,1	33,6	27,9	23,4	16,5	44,2
	B333	12,7	29,8	40,0	41,2	37,2	29,0	20,3	11,5	44,9
	B334	16,5	34,2	47,2	49,0	45,1	39,5	35,5	18,6	52,6

* Só dispõe um regime de funcionamento

Quadro 6.2 – Níveis de avaliação corrigidos do ruído particular de equipamentos nas salas com equipamentos AVAC a funcionar em velocidades máximas.

	Sala	Frequência (Hz)								$L_{Ar,nT}$ (dB)
		63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
$L_{Ar,nT,i}$ (dB) Vel. máxima	B002	12,4	28,1	27,5	27,2	26,5	21,2	14,7	8,2	33,8
	B018	28,1	36,7	41,4	42,6	47,2	39,6	34,5	25,6	50,1
	B023	26,4	32,0	35,1	35,6	35,3	31,3	26,1	18,3	41,5
	B027	38,3	52,1	48,8	45,6	47,3	42,5	32,3	23,6	55,5
	B032	20,1	28,8	32,8	33,9	35,5	30,1	22,6	16,1	40,0
	B221	16,1	37,6	45,2	52,2	43,4	37,5	30,5	18,7	53,7
	B333	18,1	34,0	50,4	52,9	48,9	40,8	34,9	15,4	56,0
	B334	21,4	38,4	51,0	53,8	52,1	46,7	43,4	26,3	57,8

Quadro 6.3 – Comparação dos valores dos níveis de avaliação padronizado do ruído particular de equipamentos nas salas com equipamentos AVAC a funcionar em velocidades normais e máxima com valor limite do RRAE.

Sala	$L_{A,r,nT}$ (normal)	$L_{A,r,nT}$ (normal) + I*	Verificação RRAE (≤ 35 dB)**	$L_{A,r,nT}$ (máximo)	$L_{A,r,nT}$ (máximo) + I*	Verificação RRAE (≤ 35 dB)**
B002	***	***	-	33,8	30,8	Cumpre
B018	41,1	38,1	Não cumpre	50,1	47,1	Não cumpre
B023	37,6	34,6	Cumpre	41,5	38,5	Não cumpre
B027	48,1	45,1	Não cumpre	55,5	52,5	Não cumpre
B032	31,7	28,7	Cumpre	40,0	37	Não cumpre
B221	44,2	41,2	Não cumpre	53,7	50,7	Não cumpre
B333	44,9	41,9	Não cumpre	56,0	53	Não cumpre
B334	52,6	49,6	Não cumpre	57,8	54,8	Não cumpre

* I= -3 dB (Incerteza); ** Equipamentos em funcionamento contínuo; *** Só dispõe um regime de funcionamento

Quadro 6.4 – Diferença entre os níveis de avaliação padronizados do ruído particular de equipamentos AVAC nas velocidades normais e máximas com o limite do RRAE.

Sala	$\Delta(\text{vel. normal})$ (=FEUP – RRAE) (dB)	$\Delta(\text{vel. máxima})$ (=FEUP – RRAE) (dB)
B002	*	-
B018	3	12
B023	-	4
B027	10	18
B032	-	2
B221	6	16
B333	7	18
B334	15	20

* Só dispõe um regime de funcionamento

Para uma melhor visualização, apresenta-se na figura 6.1 os valores dos níveis de avaliação padronizados ($L_{A,r,nT}$), com e sem fator de incerteza (I), para as diferentes salas e o valor máximo regulamentar para o funcionamento contínuo.

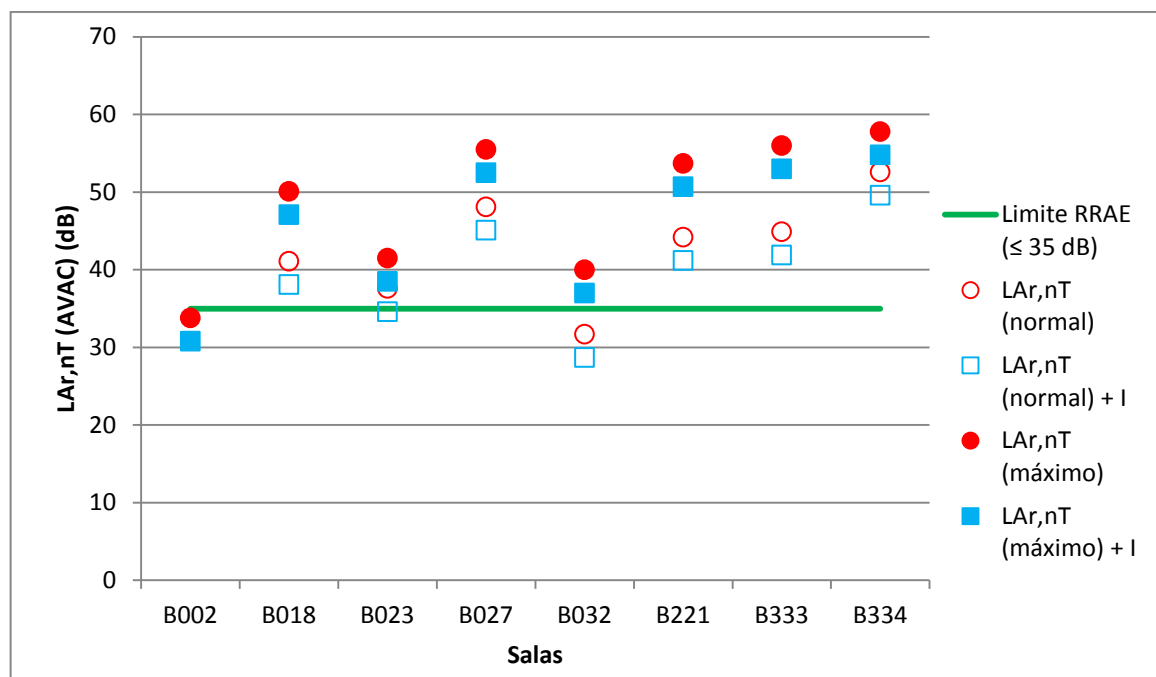


Figura 6.1 – Valores dos níveis de avaliação padronizados com e sem fator de incerteza (I) para as diferentes salas e o valor limite máximo regulamentar (RRAE) para o funcionamento contínuo.

Através da análise da figura 6.1 verifica-se que apenas as salas B002 e B032 apresentam valores do ruído de fundo com a presença dos equipamentos AVAC dentro de valores regulamentares, considerando ou não o fator de incerteza ($I=3$ dB), sendo que a B032 apenas cumpre este requisito se o equipamento AVAC estiver a funcionar na velocidade normal. O ruído de fundo com equipamento AVAC na posição normal na B023, por sua vez, consegue cumprir o valor regulamentar se na sua análise for considerado o fator de incerteza. No entanto importa salientar que a adição do fator de incerteza ao $L_{Ar,nT}$ apenas serve como elemento de avaliação das disposições regulamentares, não sendo esse o ruído realmente presente no local.

Das restantes salas, todas elas apresentam valores do ruído de fundo com a presença dos equipamentos AVAC superiores aos regulamentares, seja a velocidade de funcionamento normal ou máxima. Sendo que a sala mais próxima de cumprir o valor regulamentar é a sala B032 e a que se situa mais afastada é a B334.

Do quadro 6.4 é possível verificar valores de $L_{Ar,nT}$ considerando o fator de incerteza superiores de 3 a 15 dB(A) em relação ao máximo regulamentar com os equipamentos AVAC na posição normal. Se analisado o mesmo parâmetro com o AVAC no máximo verificam-se aumentos de 4 a 13 dB(A), passando os valores a estar acima do máximo regulamentar de 4 a 20 dB(A), isto em relação as salas sem tratamento acústico. Na sala com tratamento acústico verifica-se que a mudança da posição normal para a posição máxima, faz com que esta se passe a encontrar acima do máximo regulamentar de 2 dB(A).

Outra nota de grande importância na obtenção do $L_{Ar,nT}$ deve-se ao fato deste parâmetro corrigir o valor do nível sonoro do ruído de fundo provocado pelos equipamentos AVAC ($L_{Aeq(AVAC)}$) em função do tempo de reverberação do local recetor. Esta correção do tempo de reverberação permite reduzir os valores de $L_{Ar,nT}$ sempre que os tempos de reverberação dos locais recetores sejam superiores a 0,5 s (equação 4.1).

Neste trabalho verificou-se assim que esta correção atuava sempre de modo a baixar os valores de ($L_{Aeq(AVAC)}$), o que favoreceu bastante a sala B002 que passou de um valor de ($L_{Aeq(AVAC)}$) de 42 dB para L_{Aeq} de 34 dB.

6.2.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O tempo de reverberação devido a ser um importante parâmetro acústico, encontra-se regulamentado na legislação portuguesa através do RRAE. Este é um parâmetro que está estritamente relacionado com as propriedades do local, possibilitando assim através da sua análise determinar a sua qualidade acústica.

A comparação dos valores médios calculados para o tempo de reverberação nas frequências de 500, 1k e 2 k Hz (capítulo 5) com os valores do RRAE são apresentados no quadro 6.5 para as diferentes salas.

Quadro 6.5 – Comparação dos valores dos tempos de reverberação para as diferentes salas de aula com o limite regulamentar do RRAE.

Sala	Volume (m ³)	$TR_{\{500, 1k, 2k\}}$ (s)	$TR_{\{500, 1k, 2k\}} + I^*$ (s)	Imposição legal $TR \leq 0,15V^{1/3}$ (s)	Verificação RRAE	ΔTR (s)
B002	607	3,0	2,7	1,3	Não cumpre	1,4
B018	169	1,7	1,5	0,8	Não cumpre	0,7
B023	349	2,3	2,0	1,1	Não cumpre	0,9
B027	173	1,7	1,5	0,8	Não cumpre	0,7
B032	313	0,6	0,3	1,0	Cumpre	-
B221	456	2,2	1,9	1,2	Não cumpre	0,7
B333	134	1,8	1,6	0,8	Não cumpre	0,8
B334	192	1,8	1,6	0,9	Não cumpre	0,7

* $I=25\%$ do valor regulamentar (Incerteza)

Para uma melhor visualização, apresenta-se na figura 6.2 os valores dos tempos de reverberação, com e sem fator de incerteza (I), para as diferentes salas e o valor máximo regulamentar.

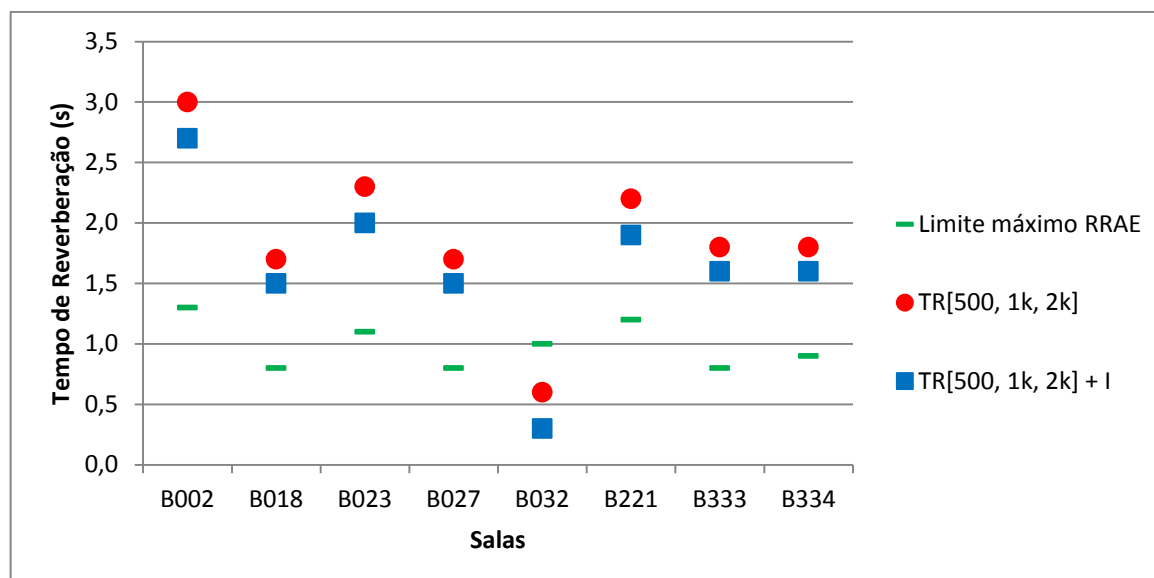


Figura 6.2 – Valores dos tempos de reverberação, com e sem fator de incerteza (I) para as diferentes salas e os valores limites máximos regulamentares do RRAE.

Através da análise do quadro 6.5 e da figura 6.2 verifica-se que apenas a sala B032 cumpre o limite regulamentar para este parâmetro acústico, independentemente de se considerar o fator de incerteza (I) na sua verificação. Este fator de incerteza do RRAE, permite uma diminuição dos valores do tempo de reverberação em 25% do valor regulamentar beneficiando assim a verificação do cumprimento legal em vez da qualidade do espaço. Outro desajuste presente neste parâmetro verifica-se na metodologia de obtenção do tempo de reverberação máximo. O atual regulamento define o tempo de reverberação máximo dos locais em função do seu volume. Tal metodologia já se verificou inadequada ao longo deste trabalho, visto que o tempo de reverberação de cada local deve unicamente ser função da atividade que aí se desenvolve. Ou caso se pretenda definir o tempo de reverberação em função do volume, impor fortes restrições no aumento do TR com o aumento do volume, de modo a que a variação do volume influencie muito pouco o TR.

Das restantes salas analisadas, verifica-se valores do tempo de reverberação sem a consideração do fator de incerteza cerca de duas vezes superior ao permitido pelo atual RRAE. Apresentado assim as salas B002, B018, B023, B027, B221, B333 e B334 valores superiores aos permitidos em 2,4; 2,0; 2,2; 1,9; 2,3 e 2,1 vezes, respetivamente. Com a consideração do fator de incerteza os mesmos valores diminuem cerca de 0,3 para cada sala.

Independentemente da consideração do fator de incerteza, é assim possível concluir que todas as salas à exceção da B032 apresentam valores muito elevados quando comparados com os valores regulamentares atuais. De modo a estas salas apresentarem valores de forma a cumprir a atual regulamentação, o tempo de reverberação deveria baixar no mínimo de 0,7 a 1,4 s.

6.3. COMPARAÇÃO DE VALORES OBTIDOS COM ESCOLA SECUNDÁRIA RODRIGUES DE FREITAS (PORTO)

6.3.1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos Portugal tem vindo a investir fortemente na recuperação de escolas secundárias devido ao fato de estas não apresentarem condições da qualidade do ar, acústicas, energéticas, térmicas, etc, necessárias a um correto funcionamento das funções que nestes espaços se desenvolvem. Para tal foi criado um Programa de Modernização do Parque Escolar Destinado ao Ensino Secundário.

Sendo a FEUP, tal como as escolas secundárias, um espaço dedicado ao ensino pretende-se, assim comparar os valores obtidos nesta com uma escola que já tenha sido alvo de intervenção por forma a averiguar se com o evoluir dos tempos tem havido um maior cuidado no projeto dos edifícios escolares, particularmente ao ruído produzido pelos equipamentos AVAC. Para tal escolheu-se comparar os valores da FEUP com os retirados da dissertação de mestrado “Caracterização acústica interior de edifícios escolares reabilitados – O caso da Escola Secundária Rodrigues de Freitas, Porto” de Maria Menezes [86]. Para além do ruído produzido pelos equipamentos AVAC foi ainda analisado o ruído de fundo sem AVAC e o tempo de reverberação.

6.3.2. Ruído de Fundo

O Ruído de Fundo foi analisado para duas situações: sem e com equipamentos AVAC ligados. Os dados referentes a estas duas situações estão presentes no quadro 6.6.

Devido à maioria dos equipamentos AVAC instalados na FEUP terem várias velocidades de funcionamento, a comparação do nível sonoro do ruído de fundo tendo em conta o funcionamento destes equipamentos com a Escola Secundária Rodrigues de Freitas (Porto) foi realizado para as duas velocidades de funcionamento consideradas neste estudo.

Quadro 6.6 – Valores dos níveis sonoros do ruído de fundo sem AVAC e níveis sonoros do ruído de fundo com o funcionamento dos equipamentos AVAC na posição normal e máxima nas salas da FEUP e na média das salas da Escola Sec. Rodrigues de Freitas [86].

Local		L _A (dB)		
		Sem AVAC	AVAC máx.	AVAC normal
Escola Sec. Rodrigues de Freitas		28,0	35,0*	
FEUP	B002	40,0	41,7*	
	B018	36,0	55,5	46,6
	B023	36,0	48,3	44,4
	B027	36,9	61,2	53,8
	B032	29,3	41,4	33,3
	B221	37,9	60,6	51,3
	B333	38,7	61,8	50,6
	B334	41,2	63,6	58,5

*Só dispõe um regime de funcionamento

Para uma melhor visualização, apresentam-se as figuras 6.3 e 6.4 relativas aos valores dos níveis sonoros do ruído de fundo sem AVAC e níveis sonoros do ruído de fundo com a presença dos equipamentos AVAC a funcionar na velocidade normal e máxima registados na FEUP e na Escola Secundária Rodrigues de Freitas.

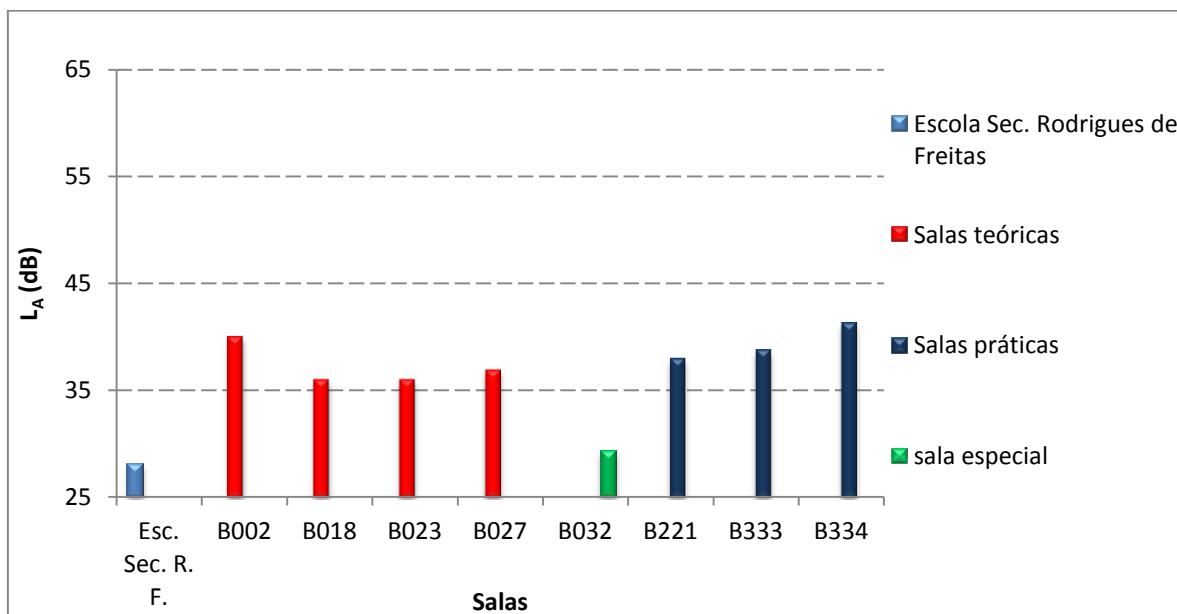


Figura 6.3 – Valores dos níveis do ruído de fundo sem AVAC na média das salas da Escola Sec. Rodrigues de Freitas (Porto) e nas salas da FEUP [86].

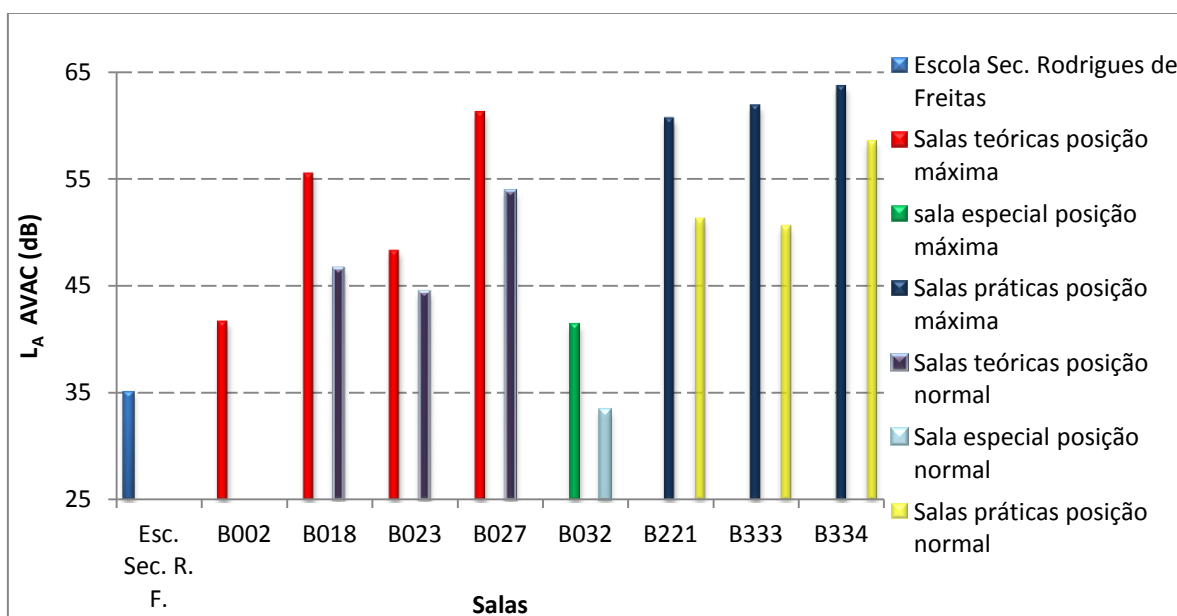


Figura 6.4 – Valores dos níveis do ruído de fundo provocado pelos equipamentos AVAC na média das salas da Escola Sec. Rodrigues de Freitas (Porto) e nas salas da FEUP para as posições de funcionamento normal e máxima [86].

Analisando o quadro 6.6 e a figura 6.3 é possível verificar que a média das salas de aula da Escola Secundária apresenta o melhor resultado para o nível sonoro do ruído de fundo sem AVAC com um valor de 28 dB(A). O melhor resultado da FEUP, com um valor de 29 dB(A), deu-se na sala B032, situando-se assim a 1 dB(A) da Escola Secundária. Por sua vez, o pior resultado ocorreu na sala B334 com um valor de 41 dB(A), o que fica 13 dB(A) acima dos da Escola Secundária.

Com o funcionamento dos equipamentos AVAC na sua posição máxima (Figura 6.4), e se analisado o nível sonoro do ruído de fundo nestas condições é possível verificar que a Escola Secundária apresenta um valor de 35 dB(A), o qual se situa 6 dB(A) abaixo do melhor resultado verificado na FEUP. Sendo que o pior resultado se situa a 29 dB(A) da referida Escola, com um valor de 64 dB(A).

Analisando a velocidade normal de funcionamento dos equipamentos AVAC, é possível verificar através da figura 6.4 que o nível sonoro do ruído de fundo passa a apresentar o seu melhor resultado para a sala B032, com um valor de 33 dB(A). Este valor fica assim 2 dB(A) abaixo da Escola Secundária. Por sua vez o pior resultado verifica-se mais uma vez na sala B334 com um valor de 59 dB(A), o qual se situa 24 dB(A) acima do valor calculado para a Escola Secundária.

A comparação das curvas NR e NC, da média das salas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas com as salas da FEUP encontra-se presente no quadro 6.7.

Quadro 6.7 - Valores das curvas NR e NC para a média das salas de aula da Escola Secundária Rodrigues de Freitas e salas da FEUP, considerando diferentes velocidades de funcionamento dos equipamentos AVAC [86].

Sala	Banda de frequência condicionante posição máxima (Hz)	Valores obtidos com AVAC na posição máxima		Banda de frequência condicionante posição normal (Hz)	Valores obtidos com AVAC na posição normal		Valores máximos recomendados	
		NR	NC		NR	NC	NR	NC
Escola Sec. Rodrigues de Freitas	125	30	30	-	-	-		
FEUP	B002	35	34	-	-	-		
	B018	53	52	1k	42	43		
	B023	42	41	500	40	39	35	30
	B027	60	63	125	51	55		
	B032	36	35	1k	28	26		
	B221	59	59	250	50	50		
	B333	59	59	500	46	46		
	B334	60	60	500	55	55		

Através da análise do quadro 6.7 é possível concluir que a média das salas de aula da Escola Secundária Rodrigues de Freitas apresenta valores das curvas NR e NC dentro dos valores máximos recomendados, em oposição à maioria das salas de aula da FEUP.

A Escola Secundária Rodrigues de Freitas apresenta a sua banda de frequência condicionante numa gama baixa, algo benéfico, pois esta banda de frequência não é a condicionante para a inteligibilidade da palavra. A FEUP por sua vez, apresenta bandas de frequências condicionantes nas salas B002 e B027 também fora das gamas de frequências condicionantes para a comunicação, sendo que as restantes salas apresentam valores de pico em gamas de grande importância para a comunicação

6.3.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Os valores obtidos por [86] relativos ao TR nas frequências de 125 a 4k Hz para a média das diferentes salas de aula são apresentados no quadro 6.8 juntamente com os valores obtidos para as salas da FEUP.

Para uma melhor visualização, apresenta-se a figura 6.5 relativa aos valores do tempo de reverberação nas frequências de 500 e 1k Hz para a FEUP e a Escola Secundária Rodrigues de Freitas (Porto).

Quadro 6.8 - Valores do tempo de reverberação por bandas de frequências para as salas de aula da FEUP e para a média das salas da Escola Sec. Rodrigues de Freitas (Porto) [86].

	Sala	Volume (m ³)	Freq. (Hz)						TR _[500,1k] (s)
			125	250	500	1k	2k	4k	
Escola Sec. Rodrigues de Freitas	*	204	0,7	0,7	0,8	1,0	1,0	0,9	0,9
FEUP	B002	607	2,9	3,4	3,4	2,9	2,7	2,2	3,1
	B018	169	2,0	1,8	1,8	1,7	1,7	1,5	1,8
	B023	349	2,5	2,6	2,4	2,3	2,2	2,0	2,3
	B027	173	2,0	1,7	1,7	1,7	1,6	1,4	1,7
	B032	313	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5	0,6
	B221	456	2,9	2,7	2,5	2,0	2,0	1,7	2,3
	B333	134	2,1	1,9	1,9	1,7	1,7	1,5	1,8
	B334	192	2,0	2,0	2,0	1,8	1,7	1,5	1,9

* Valores médios de todas as salas avaliadas

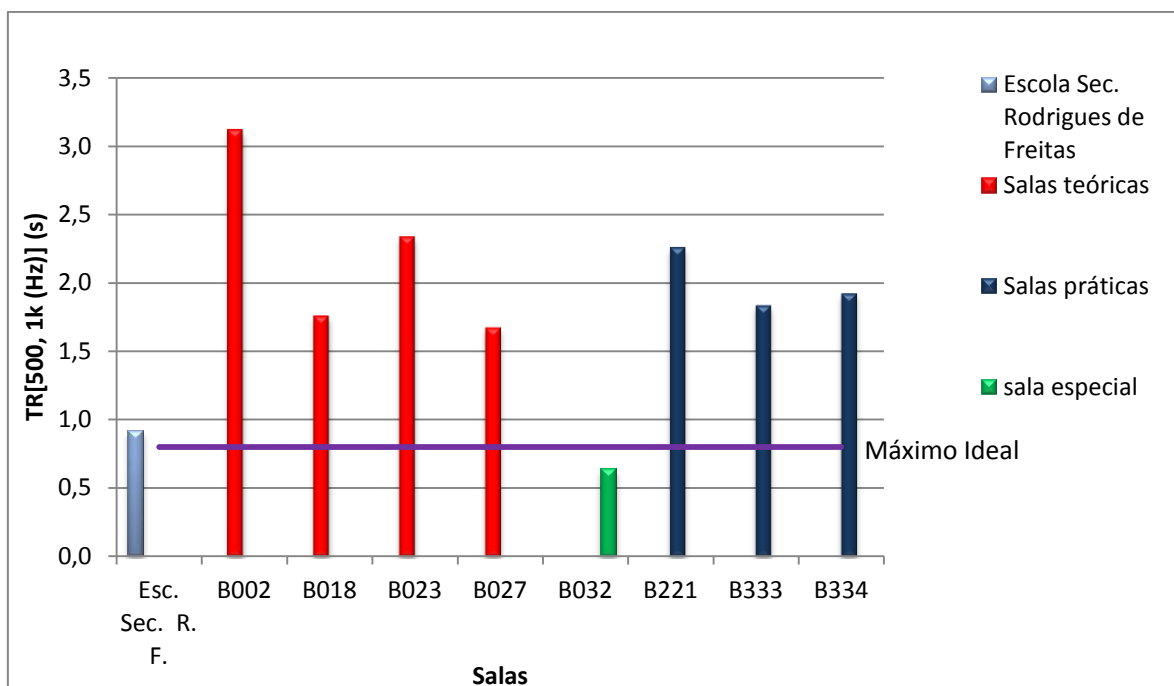


Figura 6.5 – Valores do Tempo de Reverberação médio nas frequências de 500 e 1k Hz para as salas da FEUP e média das salas de aula da Escola Sec. Rodrigues de Freitas (Porto) [86].

Através da figura 6.5 é possível verificar que o TR nas frequências de 500 e 1k Hz na Escola Secundária apresenta valores superiores aos recomendados (mais 0,1 s), mas muito abaixo dos verificados em todas as salas da FEUP à exceção da B032. Apesar das salas B018, B027, B333 e B334 apresentarem volumes inferiores à média das salas da Escola Secundária, estas salas apresentam valores do TR em cerca do dobro. Já para as salas B002, B023 e B221, estas apresentam valores superiores à mesma Escola em cerca do triplo. A sala B032 por sua vez apresenta um valor inferior à dita escola (cerca de 0,3 s), visto esta sala como já dito anteriormente beneficiar de tratamento acústico.

Verifica-se assim uma enorme vantagem da Escola Secundária Rodrigues de Freitas (Porto), a qual beneficiou na sua reabilitação de projeto acústico, perante a FEUP, a qual devido à inexistência de verbas económicas aquando a sua conceção não teve projeto acústico.

7

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo a caracterização acústica do ruído produzido pelos equipamentos de Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado (AVAC) nas salas de aula da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) através de parâmetros objetivos.

Como tal, pretendeu-se ensaiar *in situ* esses locais relativamente a três parâmetros acústicos essenciais para esse objetivo: nível de pressão sonora do ruído de fundo, RASTI e tempo de reverberação.

Os resultados médios destes três parâmetros em cada sala são apresentados em forma de resumo no quadro 7.1.

Com os valores dos níveis de pressão sonora foi ainda possível calcular os valores do AI e do PSIL, apresentados no quadro 7.2.

Quadro 7.1 – Quadro resumo dos valores dos níveis sonoros do ruído de fundo e RASTI sem e com a presença do funcionamento dos equipamentos AVAC na FEUP, bem como dos valores médios do tempo de reverberação.

Sala	Sem AVAC		Com AVAC velocidade normal				Com AVAC velocidade máxima			TR _[500, 1k] (s)	TR _[500, 1k, 2k] (s)
	L _A (dB)	RASTI	L _A (dB)	NR	NC	RASTI	L _A (dB)	NR	NC		
B002	40,0	0,41	*	*	*	0,39	41,7	35	34	3,1	3,0
B018	36,0	0,50	46,6	42	43	0,48	55,5	53	52	1,8	1,7
B023	36,0	0,45	44,4	40	39	0,44	48,3	42	41	2,3	2,3
B027	36,9	0,50	53,8	51	55	0,48	61,2	60	63	1,7	1,7
B032	29,3	0,77	33,3	28	26	0,76	41,4	36	35	0,6	0,6
B221	37,9	0,48	51,3	50	50	0,47	60,6	59	59	2,3	2,2
B333	38,7	0,50	50,6	46	46	0,49	61,8	59	59	1,8	1,8
B334	41,2	0,50	58,5	55	55	0,48	63,6	60	60	1,9	1,8

* Só dispõe um regime de funcionamento

Quadro 7.2 – Quadro resumo dos valores do AI e do SIL sem e com a presença do funcionamento dos equipamentos AVAC na FEUP.

Sala	Distância máxima existente (voz normal) (m)	Sem AVAC			Com AVAC velocidade normal			Com AVAC velocidade máxima		
		AI	PSIL (dB)	Distância máxima possível (voz normal) (m)	AI	PSIL (dB)	Distância máxima possível (voz normal) (m)	AI	PSIL (dB)	Distância máxima possível (voz normal) (m)
B002	13	1,00	32	12	*	*	*	0,99	33	11
B018	8	1,00	30	15	0,94	40	4	0,65	49	2
B023	12	1,00	30	15	0,94	37	7	0,65	41	4
B027	9	1,00	31	13	0,89	43	3	0,60	51	1
B032	10	1,00	23	32	1,00	32	12	1,00	34	10
B221	22	1,00	31	13	0,94	39	5	0,67	51	1
B333	6	1,00	33	11	0,91	42	4	0,56	54	0,3
B334	9	1,00	36	7	0,62	51	1	0,39	57	0,3

* Só dispõe um regime de funcionamento

Fazendo uma análise aos valores do ruído de fundo com o funcionamento dos equipamentos AVAC é possível verificar um aumento assinalável nas diferentes salas, o que permite concluir que equipamentos com as mesmas características induzem aumentos diferentes. Analisando os equipamentos AVAC a funcionar numa velocidade normal, é possível concluir que apenas a sala B032 é capaz de cumprir os valores máximos recomendados pelas curvas NR e NC, sendo que as restantes salas se situam bastante aquém destes valores. Em termos legislativos, para a velocidade normal, apenas a B032 e a B023 são capazes de cumprir os valores regulamentares, sendo que a última só cumpre se na sua análise se tiver em conta o fator de incerteza. Com o funcionamento dos equipamentos na velocidade máxima apenas se verifica o cumprimento dos valores regulamentares na B002 devido a esta sala possuir o equipamento AVAC na cobertura (*ROOFTOP*), permitindo assim que o ruído produzido pelo equipamento não seja sentido com tanta intensidade no interior da sala.

Os valores relativos aos parâmetros de análise da inteligibilidade da palavra calculados através dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo, AI e PSIL, permitiram concluir que a utilização dos equipamentos AVAC faz reduzir em muito a capacidade de comunicação no interior das salas. É possível observar reduções de AI de aproximadamente 0,40 (em 1,00 máximo possível) em quase todas as salas com o funcionamento dos equipamentos AVAC no máximo em relação ao ruído sem equipamentos, sendo que com os equipamentos na velocidade normal a redução andou por volta de 0,10 em quase todas as salas. A única que não apresenta qualquer variação é a B032, devido a possuir tratamento acústico.

Através do PSIL para um esforço de voz normal (o qual deveria ser utilizado em salas de aula) foi possível observar reduções drásticas das distâncias máximas possíveis entre o orador e o ouvinte com

a entrada em funcionamento dos equipamentos AVAC no máximo em quase todas as salas. Para esta velocidade de funcionamento dos equipamentos AVAC a quase totalidade das salas apresentou distâncias máximas possíveis entre orador e ouvinte de 1 m de forma a que a comunicação fosse no limite possível, sendo que a distância máxima existente entre orador e ouvinte está compreendida entre 8 a 22 m. Para a velocidade normal dos equipamentos, a distância máxima possível para a comunicação da palavra diminui aproximadamente para metade da distância máxima existente entre o orador e o ouvinte. Conclui-se destes valores, que a utilização dos equipamentos AVAC no máximo degrada por completo a comunicação no interior das salas, validando a opção de medir o RASTI numa posição intermédia.

Relativamente ao RASTI é possível concluir que a entrada em funcionamento dos equipamentos AVAC na velocidade normal afeta este parâmetro numa diferença máxima de 0,02. Neste mesmo quadro é possível verificar que o pior resultado, sem equipamentos ligados, ocorre na sala B002, com valor de 0,41 obtendo assim um grau de inteligibilidade fraco devido maioritariamente ao seu elevado volume. O melhor resultado, por sua vez, ocorrido nas salas sem tratamento acústico teve lugar nas salas B018, B027, B333 e B334 com um valor de 0,50, correspondente a uma razoável inteligibilidade da palavra. A sala com tratamento acústico, B032, apresentou um resultado de 0,77, o qual corresponde a uma excelente inteligibilidade. Todos os valores anteriormente referidos sofrem reduções em 0,01 ou 0,02 com a entrada em funcionamento dos equipamentos.

É assim possível concluir que todas as salas da FEUP à exceção da B032 (aonde não há aulas) apresentam valores de RASTI bastante baixos, relativamente ao recomendado pelo documento BB93 ($\text{RASTI} \geq 0,65$).

Por último, a análise do tempo de reverberação permite concluir que todas as salas à exceção da B032 apresentam valores do tempo de reverberação médio, nas frequências centradas em 500 e 1k Hz, muito elevados comparativamente ao máximo recomendado de 0,8 s. A pior sala apresenta valores 4 vezes superiores ao recomendado, enquanto que a melhor sala sem tratamento acústico, apresenta valores 2 vezes superiores.

Em termos legislativos, este parâmetro devido a ser analisado nas frequências de 500 a 2k Hz, permite que haja um redução de 0,1 s, em relação às frequências de 500 e 1k Hz, em quase todas as salas, devido ao tempo de reverberação decair com o aumento da frequência.

Comparando os valores obtidos nas frequências de 500 a 2k Hz com os regulamentares, é possível concluir que estes apresentam valores superiores aos máximos permitidos, sendo a exceção feita pela B032. Esta sala apresenta valores dentro dos regulamentares quer na sua análise se tenha em conta o fator de incerteza ou não.

Em comparação com a Escola Secundária Rodrigues de Freitas (Porto), a FEUP obteve os piores resultados, sendo estes bastantes superiores, em relação ao ruído de fundo e ao tempo de reverberação.

Com este estudo foi possível concluir que todas as salas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto que não possuem tratamento acústico apresentam valores do nível de pressão sonora, RASTI e tempo de reverberação bastante desadequados ao tipo de atividades que se desenrolam nestas instalações. Tornar-se-ia bastante importante proceder a medidas corretivas nestas salas de modo a melhorar o processo de ensino, e assim beneficiar os utentes deste espaço.

Após a conclusão deste trabalho confirma-se a necessidade da realização de reparações a nível acústico nas salas de aula, de forma a que estas passem a obter boas condições de comunicação verbal.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

De forma a completar o estudo iniciado neste trabalho, poderiam ser realizadas medições a outros parâmetros tal como a Claridade (C_{80}), a Definição (D_{50}) e a percentagem de perda de consoantes (%ALCONS) com e sem os equipamentos AVAC em funcionamento. Seria também interessante medir o ruído de fundo com e sem os equipamentos AVAC em funcionamento para as horas de ponta, ou seja, na entrada e saída de alunos nas salas adjacentes às de ensaio.

Poderiam também ser realizadas medições ao ruído provenientes de outros tipos de equipamentos, tal como: projetores de vídeo e retroprojetores.

O tempo de reverberação poderia também ser ensaiado para várias taxas de ocupação das salas, para assim verificar a sua redução com o aumento da área absorvente.

Por último a realização de inquéritos a alunos estrangeiros seria também benéfica de forma a analisar subjetivamente a qualidade das salas de aulas na presença de uma língua que não a materna.

Referências Bibliográficas

- [1] A Necessidade da Comunicação, <http://cliquediario.blogspot.pt/2009/06/necessidade-da-comunicacao.html>, [Acedido em 23 Março 2013].
- [2] J. E. Bordenave, O que é a comunicação - 1ª edição, São Paulo, 2003.
- [3] A.P. O. Carvalho, Acústica Ambiental e de Edifícios, FEUP, Porto: Edição 8.2, 2012.
- [4] Kinsler, Frey, Coppens, Sanders, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, California, 1980.
- [5] Capítulo II fundamentação teórica acústica, [http://www.ufpa.br/gva/Arquivos%20PDF/MARLEN NE/5_CAPITULO%20III.pdf](http://www.ufpa.br/gva/Arquivos%20PDF/MARLEN%20NE/5_CAPITULO%20III.pdf), [Acedido em 7 Março 2013].
- [6] Heinrich Kuttruff, Acoustics: An Introduction, Taylor & Francis, Estugarda, 2004.
- [7] Timber acoustic, http://www.damadeira.pt/xFiles/scContentDeployerTimber_pt/docs/Doc134.pdf, [Acedido em 10 Março 2013].
- [8] López e Manuel Recuero, Acústica Arquitectonica Aplicada, Editorial Paraninfo, Madrid, 1999.
- [9] David Blackstock, Fundamentals of Physical Acoustics, John Wiley & Sons Inc, 2000.
- [10] Limites do nível de Intensidade http://www.eca.usp.br/prof/iazzetta/tutor/acustica/intensidade/limites_de_audibilidade.htm, [Acedido em 4 Março 2013].
- [11] Heinrich Kuttruff, Room Acoustics, 4ª edição, Spon Press, 2000.
- [12] Riscos Físicos – Ruído, <http://www.prof2000.pt/users/eta/ruido.htm>, [Acedido em 5 Março 2013].
- [13] Propriedades Físicas do Som, <http://lisboaverde.cm-lisboa.pt/index.php?id=4227>, [Acedido em 5 Março 2013].
- [14] Allan Pierce, Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications, Acoustical Society of America, 1989.
- [15] Propriedades do Som, <http://www.arauto.uminho.pt/pessoas/lanceros/Material%20LEGI/Material%20%20LEGI/Acustica.pdf>, [Acedido em 5 Março 2013].
- [16] Cavanaugh et al., Architectural Acoustics: Principles and Practice, 2th edition, John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [17] Tabela Pressão Sonora, <http://www.vibrasom.ind.br/produtos-acusticos/tabela-pressao-sonora-sonique.php>, [Acedido em 5 Março 2013].
- [18] Lord, Gatley, Evensen, Noise Control For Engineers, Robert E. Krieger Publishing Co., Inc., Florida, 1987.
- [19] Conceitos fundamentais do som, www.ergonomia.ufpr.br/RuidosVibeIllumCalixto.doc, [Acedido em 6 Março 2013].
- [20] Psicoacústica, http://www.img.lx.it.pt/~fp/cav/ano2007_2008/MEEC/Trabalho_29/ArtigoCAV%20Edgar%20-%20Luz/ArtigoCAV%20Edgar%20-%20Luz/psicoacustica.htm, [Acedido em 19 Março 2013].

- [21] Ruído, <http://www.factor-segur.pt/shst/docinformativos/Ruido.html>, [Acedido em 6 março 2013].
- [22] Ivan Tashev, *Sound Capture and Processing: Practical Approaches*, John Wiley & Sons, 2009.
- [23] Gavriel Salvendy, *Handbook of Human Factors and Ergonomics*, 4th edition, John Wiley & Sons, 2012.
- [24] Gracey & Associates, <http://www.gracey.com/basics/leq-b1.htm>, [Acedido em 6 Março 2013].
- [25] Dóris Queirós, *Caracterização do Comportamento Acústico de Edifícios Reabilitados*. Mestrado em Engenharia Civil, Especialização em Construções, FEUP, 2010.
- [26] Ernesto Dias, *Ruído nos Locais de Trabalho*, Delta Consultores e ISPA, Lisboa, 2007.
- [27] Decreto-Lei n.º 182/06 de 6 de Setembro, prescrições mínimas de segurança e saúde respeitantes à exposição dos trabalhadores aos riscos devidos ao ruído.
- [28] Diana Vidal, *Metodologia Multi - Critério para a análise da qualidade acústica em salas de audiência de tribunais*. Mestrado em Engenharia Civil, Especialização em Construções, FEUP, 2008.
- [29] Humes, Bell, Ahlstrom, Kincaid, *Speech-Recognition Difficulties of the Hearing-Impaired Elderly: The Contributions of Audibility*, *Journal of Speech and Hearing Research*, vol. 29, p. 447, 1986.
- [30] Índice de Articulação, <http://www.soundmaskingblog.com/2012/07/articulation-index/>, [Acedido em 10 Março 2013].
- [31] Índice de Articulação, <http://www.fileden.com/files/2008/1/4/1680138/MyWork/NOISEARTICULATION.pdf>, [Acedido em 10 Março 2013].
- [32] Raichel, *The Science and Applications of Acoustics* 2th edition, Springer, 2006.
- [33] Ballou e Glen, *Handbook for Sound Engineers*, 4th edition, Focal Press Elsevier, 2008.
- [34] Carla Barreira, *Conforto e Qualidade Ambiental na Utilização de Parques Desportivos Escolares em Portugal*, FADEUP, Dissertação com vista à obtenção do grau de Doutor na área de Ciências do Desporto pela Faculdade de Desporto da Universidade do Porto, 2012.
- [35] Variação do RASTI, <http://eduardoleal.ehost-services146.com/carlab/icg.pdf>, [Acedido em 11 Março 2013].
- [36] A. P. O. Carvalho, *Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches*, *Applied Acoustics*, vol.58, p. 35, 1998.
- [37] ANSI S12.65-2006, *American National Standard For Rating Noise With Respect to Speech Interference*.
- [38] “Speech Interference Levels in Aircraft Interior Noise Measurement: Their Use and Interpretation,” [Online]. Available: <http://www.armchair.com/sci/brunt1.html>, [Acedido em 15 Junho 2013].
- [39] Fátima Fernandes, *Análise e Caracterização do Ruído de Equipamentos AVAC em Edifícios Públicos*. Mestrado em Engenharia Civil, Especialização em Construções, FEUP, 2010.
- [40] Noise Criterion, http://www.engineeringtoolbox.com/nc-noise-criterion-d_725.html, [Acedido em 2 Abril 2013].

- [41] Noise Rating, http://www.engineeringtoolbox.com/nr-noise-rating-d_60.html, [Acedido em 2 Abril 2013].
- [42] D. Mateus, Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído, <http://paginas.fe.up.pt/~pgrpe/conteudos/ARE/Apontamentosda disciplina.pdf>, [Acedido em 9 Março 2013].
- [43] McQuiston, Parker e Spitler, Heating, Ventilating, and Air Conditioning, 6th edition, John Wiley & Sons, Inc., EUA, 2005.
- [44] Parker e McQuiston, Heating, Ventilating, and Air Conditioning, Analysis and Design, 2th edition, Oklahoma State University, John Wiley & Sons, Inc.
- [45] L. Roriz, Climatização - Concepção, Instalação e Condução de Sistemas, Orion, Amadora, 2006.
- [46] Schaffer e Mark, A Pratical Guide to Noise and Vibration Control for HVAC System, SI Edition, California, 1993.
- [47] Rooftop, <http://www.headpower.com.pt/2-rooftop-air-conditioner-1b.html>, [Acedido em 14 Março 2013].
- [48] Planta de localização das salas, www.fe.up.pt, [Acedido em 25 Março 2013].
- [49] Piedade, Rodrigues e Roriz, Climatização em Edifícios - Envolvente e Comportamento Térmico 2ª edição, Orion, Amadora, 2003.
- [50] Freitas e Ramos, Aula Teórica de Térmica de Edifícios, MIEC - 5º ano, FEUP, 2013.
- [51] Norma EN ISO 7730, Ergonomics of the thermal environment: analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2005.
- [52] Conforto Térmico, <https://woc.uc.pt/dem/getFile.do?tipo=2&id=6899>, [Acedido em 11 Abril 2013].
- [53] Surdez, sociedade e educação, www.ufpa.br/soure/Documents/DownloadsBlog/Surdez_III.pptx, [Acedido em 19 Março 2013].
- [54] Ministério da Saúde Brasileiro, Perda auditiva induzida por Ruído, Secretaria de Atenção à Saúde, Departamento de Ações Programáticas Estratégicas, Brasília, 2006.
- [55] Decreto-Lei nº 129/2002 de 1 de Maio, Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios – R.R.A.E.
- [56] Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho, Regulamentos dos Requisitos Acústicos dos Edifícios – R.R.A.E.
- [57] Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas, http://www.aiccopn.pt/news.php?news_id=996. [Acedido em 20 março 2013].
- [58] Tempo de Reverberação na Alemanha, http://www.owa.de/docs/pdf/13_Acoustics_091110.pdf. [Acedido em 8 Abril 2013].
- [59] DIN 18041, Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen, 2004.
- [60] Zannin, Zwirter e Passero, Assessment of Acoustic Quality in Classrooms Based on Measurements, Perception and Noise Control, Federal University of Paraná – Brasil.
- [61] Karabiber e Vallet, Classroom acoustics policies - An overview, Euronoise, Naples, 2003.

- [62] Vallet, Karabiber, *et al.* - Some European policies regarding acoustical comfort in educational buildings, Institute of Noise Control Engineering, vol. 50, 2002.
- [63] DIN 4109, Baulicher Schallschutz, 2006.
- [64] Norma NBR 6401, Instalações centrais de ar-condicionado para conforto, ABNT.
- [65] Norma NBR 12179, Tratamento Acústico em Recintos Fechados, ABNT.
- [66] Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo - Torroja. IETcc- CSIC - Unidad de calidad en la construcción, Guía de aplicación del DB HR Protección frente al ruido, 2009.
- [67] REAL DECRETO 286/2006, Exposición de los Trabajadores al ruido, 2006.
- [68] ANSI/ASA S.12.60, American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, 2010.
- [69] Vallet, Auzilleau e Lemonnier, A new regulation for educational buildings in France; a comparison with existing policies in other countries, Euronoise, Naples, 2003.
- [70] Department for Education and Skills. Building Bulletin 93 – Acoustic Design for Schools. Londres, 2003.
- [71] História da FEUP, http://sigarra.up.pt/feup/pt/web_base.gera_pagina?p_pagina=1183, [Acedido em 10 Abril 2013].
- [72] História da FEUP, http://sigarra.up.pt/feup/pt/web_gessi_docs.download_file?p_name=F885733837/SFA_Nota%20Hist%F3rica.pdf, [Acedido em 10 Abril 2013].
- [73] Casa dos meninos Órfãos da Cidade do Porto, http://www.gophoto.it/view.php?i=http://3.bp.blogspot.com/C6_02tdzjfM/T3yQsPh4LaI/AAAAAAAAABtE/3p-FK8Ny1DY/s1600/reitoria2.jpg, [Acedido em 17 Abril 2013].
- [74] FEUP na Rua dos Bragas, http://centenario.up.pt/ver_momento.php?id_momento=31, [Acedido em 13 Abril 2013].
- [75] Foto FEUP na Rua dos Bragas <http://centenario.up.pt/momentos/43c7342d99.jpg>, [Acedido em 5 Abril 2013].
- [76] FEUP atual, <http://paginas.fe.up.pt/~ee99002/images/FEUP2.jpg>, [Acedido em 5 Abril 2013].
- [77] L. Ramalho, Documento cedido a pedido pessoal da descrição arquitetónica da FEUP.
- [78] NP EN ISO 16032, Acústica: medição do nível de pressão sonora de equipamentos de serviço em edifícios: método de engenharia, 2009.
- [79] Curvas de Incomodidade, <http://www.engineeringtoolbox.com>, [Acedido em 3 Maio 2013].
- [80] CEI 60268-16, Objective rating of speech intelligibility by the Speech Transmission Index, 1998.
- [81] NP EN ISO 3382, Acústica: medição de parâmetros de acústica de salas. Parte 2, tempo de reverberação em salas correntes, 2011.
- [82] Ansen e Bies, Engineering Noise Control: Theory and Practice, Spon Press, Nova York, 2009.
- [83] Seep, Glosemeyer *et al.*, Classroom Acoustics a resource for creating learning environments with desirable listening conditions, Technical Committee on Architectural Acoustics of the Acoustical Society of America, 2000.

- [84] Bradley e Bistafa, Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics, Institute for Research in Construction—Acoustics, National Research Council—Canada, Ottawa, 1999.
- [85] Knut Marczinske, Classroom acoustics – an academic playground or a major subject for qualified education?, 4th european conference on noise control, Berlin, 2001.
- [86] Maria Menezes, Caracterização acústica interior de edifícios escolares reabilitados – O caso da Escola Secundária Rodrigues de Freitas, Mestrado em Engenharia Civil, Especialização em Construções, FEUP, 2010.

